

Masteroppgave, Institutt for geofag

En analyse av massebalansemålinger på Storbreen, Jotunheimen

*Med hovedfokus på snøfordeling og vinterbalanse
1996-2010*

Tor Øksendal



UNIVERSITETET I OSLO

DET MATEMATISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

En analyse av massebalansemålinger på Storbreen, Jotunheimen

Med hovedfokus på snøfordeling og vinterbalanse 1996-2010

Tor Øksendal



Masteroppgave i geofag

Studieretning: Naturgeografi

Institutt for geofag

Matematisk-naturvitenskaplig fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

Desember 2011

© Tor Øksendal, 2011

Veileder: Professor Jon Ove Hagen, Institutt for geofag, UiO

Ekstern veileder: Forsker Liss Marie Andreassen, Seksjon for bre, is og snø, Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE)

Dette eksamensarbeidet er publisert elektronisk i DUO – Digitale Utgivelser ved UiO

<http://www.duo.uio.no>

Det er også katalogisert i BIBSYS (<http://www.bibsys.no/>)

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted, in any form or by any means, without permission.

Forsidefoto: Stakemåling på Storbreen, mai 2010. Foto: Liss Marie Andreassen

Forord

Jeg vil takke mine to veiledere Liss M. Andreassen (forsker ved Norges vassdrags- og energidirektorat, seksjon for bre, is og snø) og professor Jon Ove Hagen (UiO, Institutt for Geofag) for den gode hjelpen jeg har fått i forhold til å belyse problemstillingene og skaffe til veie de nødvendige data. Jeg har vært så heldig å få være med opp på Storbreen i felt for å observere, lære og gjøre målinger tre ganger. To ganger med NVE (med Liss M. Andreassen og Rune Engeset i mai 2010, og med Liss M. Andreassen og Solveig H. Winsvold i august 2010), og en gang med Jon Ove Hagen og kursdeltagere i GEO4410 høsten 2009. Dette har vært lærerike og inspirerende turer, og jeg vil takke alle som har bidratt til å gjøre dem mulig for meg, praktisk og finansielt, både ved seksjon for bre, is og snø på NVE og på Institutt for Geofag.

For øvrig vil jeg takke alle som har arbeidet for å bygge opp datagrunnlaget jeg har brukt i oppgaven, blant annet personell fra NVE og Norsk Polarinstitut, som har gjort massebalansemålinger, og personell fra Institute for Marine and Atmospheric research Utrecht (IMAU), som vedlikeholder den automatiske værstasjonen på Storbreen.

Jeg vil også takke min kjæreste og samboer Kirsten Bråten for hennes støtte, oppmuntring og tro på meg gjennom arbeidet.

Tor Øksendal

Blindern, november 2011

Sammendrag

Med sikte på å teste robustheten i massebalanseberegningene på den alpine breen Storbreen i Jotunheimen, er det beregnet vinterbalanse med utgangspunkt i fire tilfeldige utvalg av sonderingsverdier (data fra Norges Vassdrag- og Energidirektorat) fra 2010, og utvalg med hhv. mer enn 10° helning og opptil 10° helning. Beregnet massebalanse for de tilfeldige utvalgene hadde små avvik på maksimalt 2,2 % av volumvinterbalansen basert på alle sonderinger. Utvalget med mer enn 10° helning og opptil 10° helning hadde noe større avvik på hhv. 7,5 % og 4,2 %. Med utgangspunkt i massebalansediagrammene har høydeintervaller med relativt stor snødybdevariasjon blitt identifisert og deretter analysert med hensyn til helning, aspekt og fysiske avgrensninger. Av dette går det fram at det for 2010 er stor spredning i sonderingsverdier i noen høydeintervaller hvor målingene er gjort i terreng som varierer med hensyn på aspekt, helning og vindutsatthet. Høydeintervallene 1650-1700, 1850-1900 og 1900-1950 har betydelig areal og relativt stor spredning i sonderingsverdier. Dette demonstrerer at det er et potensial for skjevhet i en massebalanseberegning basert på lite representative utvalg av disse høydeintervallene.

Snødybden på Storbreen varierer lokalt med relativt høyere snødybde i nedsenkninger og konkavt terreng, som f.eks. mot de bratte skråningene som omgir breen, og relativt lavere snødybde der det er konvekse trekk i terrenget. Snøfordelingskart som illustrerer den relative variasjonen i snødybde 1996-2010, viser at noen år, f.eks. 1996, 1998, 2004 og 2006, har større variasjon enn f.eks. 1997, 1999, 2002 og 2007. I forhold til høyde er snødybden generelt relativt lavere i den nordvestlige delen av breen, der et fjellpass åpner opp for kanalisering av vind nedover breen fra vest til øst, og dette er tilfelle i alle snøfordelingskart 1996-2010.

I en sammenligning av massebalanse ved ulike stakeposisjoner med massebalanse for hele breen og NAO-indeks 1985-2010, er det funnet sterkest korrelasjon med hele breen ved stake 3 (ca. 1600 m.o.h.) og 4 (ca. 1715 m.o.h.), som ligger noe lavere enn gjennomsnittlig ELA (ca. 1800 m.o.h. fra 1985 til 2010), for både b_n , b_w og b_s . For Storbreen er det funnet en ganske sterk korrelasjon mellom NAO-indeks (1.okt.-30.apr.) og hhv. b_w ($r^2 = 0,35$) og b_n ($r^2 = 0,34$), og korrelasjonen er generelt sterkere for de lavereliggende stakene enn de høyereliggende. Korrelasjonen er spesielt svak for de høyereliggende stakene 6 og 5, som ligger i le bak Store Smørstabbtinden (2208 m.o.h.), og dermed er mindre utsatt for vindablasjon fra vestlige vinder.

Innhold

1 Introduksjon	5
1.1 Bakgrunn	5
1.2 Problemstilling, motivasjon og hovedpunkter i analysen	6
2 Området	8
2.1 Geografi på og rundt Storbreen	8
2.2 Klima i området	10
2.3 Glasiologi og massebalanse	13
3 Teori	19
3.1 Massebalanse, akkumulasjon og ablasjon	19
3.2 Glasiologi	20
3.3 Metode for måling og beregning av overflatemassebalanse	23
3.4 NAO-indeks	27
3.5 Interpolasjon ved kriging	28
4 Data	29
4.1 Målinger og beregninger av overflatemassebalanse	28
4.2 NAO-indeks	31
4.3 Kartlag og terrengmodeller	31
4.4 Snødybdemålinger	32
4.5 Vinndata og temperaturdata fra AWS på Storbreen	33
4.6 Vinndata fra Sognefjellhytta	35
4.7 Nedbørsdata fra Bøverdalen	35

5 Metode og databehandling	37
5.1 Sammenligning av stakemassebalanse, totalmassebalanse og NAO-indeks.....	37
5.2 Vinddata, temperaturdata og nedbørsdata.....	38
5.3 Relativ snødybde og snøfordelingskart.....	39
5.4 Helning, aspekt og "hillshade".....	41
5.5 Massebalanseberegning for forskjellige utvalg av sonderingspunkter.....	42
6 Resultater og observasjoner	45
6.1 Sammenligning av stakemassebalanse, totalmassebalanse og NAO-indeks.....	45
6.2 Vinddata, temperaturdata og nedbørsdata.....	55
6.3 Helning-, aspekt- og "hillshade".....	61
6.4 Relativ snødybde.....	63
6.5 Massebalanseberegning for forskjellige utvalg av sonderingspunkter.....	71
6.6 Variasjon i snøfordeling - sammenligning med helning og aspekt.....	80
7 Diskusjon	90
7.1 Sammenligning av stakemassebalanse, totalmassebalanse og NAO-indeks.....	90
7.2 Relativ snødybde og variasjon i snøfordeling.....	92
7.3 Massebalanseberegning for forskjellige utvalg av sonderingspunkter	95
8 Konklusjon	97
9 Referanseliste	99

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Kort tid etter at Norsk Polarinstitutt ble opprettet i 1948 ble det planlagt å iverksette grundige undersøkelser av en av breene i Jotunheimen (Liestøl, 1967). Etter konsultasjoner mellom O. Liestøl ved Norsk Polarinstitutt, Professor W. Werenskjold ved Geografisk Institutt, UiO, og H. Klæboe ved Vassdragsvesenet, ble Storbreen valgt ut. Det var flere fordeler ved å velge Storbreen framfor andre breer, bl.a. dens moderate størrelse og det at breen var relativt lett tilgjengelig fra en vei ca. 2 km fra brefronten. En annen fordel var dreneringsområdets skarpe og veldefinerte grenser, samt at en stor andel av dette har isoverflate, som er en stor fordel i forbindelse med måling av avrenning. En ulempe man så med Storbreen var at overflaten er ujevn, noe som kompliserer akkumulasjons- og ablasjonsmålingene.

I 1994 overtok Norges Vassdrag- og Energidirektorat (NVE) ansvaret for massebalansemålinger av Storbreen, og undersøkelsene av breen har fortsatt. I 2001 utplasserte Institute for Marine and Atmospheric research Utrecht (IMAU) en automatisk værstasjon (AWS) på Storbreen, og dette har gjort det mulig å studere energibalansen og meteorologien på breen i detalj, som det er gjort av Andreassen et al. (2008b) og Giesen et al. (2009). Meteorologiske data fra AWS har også blitt benyttet i modellering av massebalanse og klimasensitivitet på Storbreen av Andreassen og Oerlemans (2009).

Gjennom perioden med massebalansemålinger har det generelt vært et pågående ismassetap på Storbreen og andre breer i Sør-Norge med relativt tørt klima, som det også har vært på de fleste målte breer i verden i takt med høyere globale temperaturer. FN's klimapanel (IPCC, 2007) viser til klimamodeller som predikerer økende nedbør i nordvestlige Europa og økende globale temperaturer fram mot år

2100 på ca. 2-5 grader. Storbreen, med sin lange massebalanseserie fra 1949, er relevant å følge og analysere i denne kontekst.

1.2 Problemstilling, motivasjon og hovedpunkter i analysen

Et relevant spørsmål er i hvilken grad snøfordelingen på en ujevn breoverflate som Storbreen varierer mellom forskjellige høydeintervaller og fra år til år, og hvilke faktorer som spiller inn på snøfordelingen. Et hovedpunkt i analysen er å undersøke i hvilken grad faktorer som helning, aspekt (helningsvinkel), vind, temperatur og NAO-indeks har en tydelig innvirkning på snøfordelingen. En kontinuerlig serie med akkumulasjonskart fra 1994 til 2010, samt 23 akkumulasjonskart fra 1951 til 1984, har vært tilgjengelig i analysen, i tillegg til høydemodeller fra 2009, 1997, 1984, 1968, 1951 og 1940. Med utgangspunkt i akkumulasjonskartene kan snøfordelingens karakter studeres i ulike høydeintervaller og fra år til år, og med utgangspunkt i høydemodellene kan helning og aspekt studeres i lys av snøfordelingen. Kvaliteten på høydemodeller og kart er best fra 1997 og utover og tilgangen på relevante meteorologiske data er størst fra 2000-tallet, så i analysen er det i størst grad sett på akkumulasjonskart fra 1996 til 2010. Forfatteren har vært med NVE-personell å gjøre akkumulasjonsmålinger for akkumulasjonssesongen 2010, og det er her gjort spesielt grundig analyse av 2010.

En AWS har vært i drift på Storbreen siden 2001, og det er benyttet vind- og temperaturdata fra denne stasjonen i analysen. Et interessant spørsmål er hvordan vindretningen og vindhastigheten varierer fra år til år, og hvorvidt vindmønsteret gjør seg tydelig på snøfordelingen. Det er også sett på vinddata fra værstasjonen på Sognefjellshytta, 8 km vest for Storbreen, og hvordan vindmønsteret er her i forhold til ved Storbreen AWS. Det er også interessant å se på lufttemperaturens variasjon i forhold til spørsmålet om noen av akkumulasjonssesongene har hatt en større andel av nedbøren i form av regn enn andre, da særlig på høsten og våren. I den

forbindelse er det gjort en sammenligning av nedbørsdata fra værstasjonen Bøverdalen og temperaturdata fra Storbreen AWS.

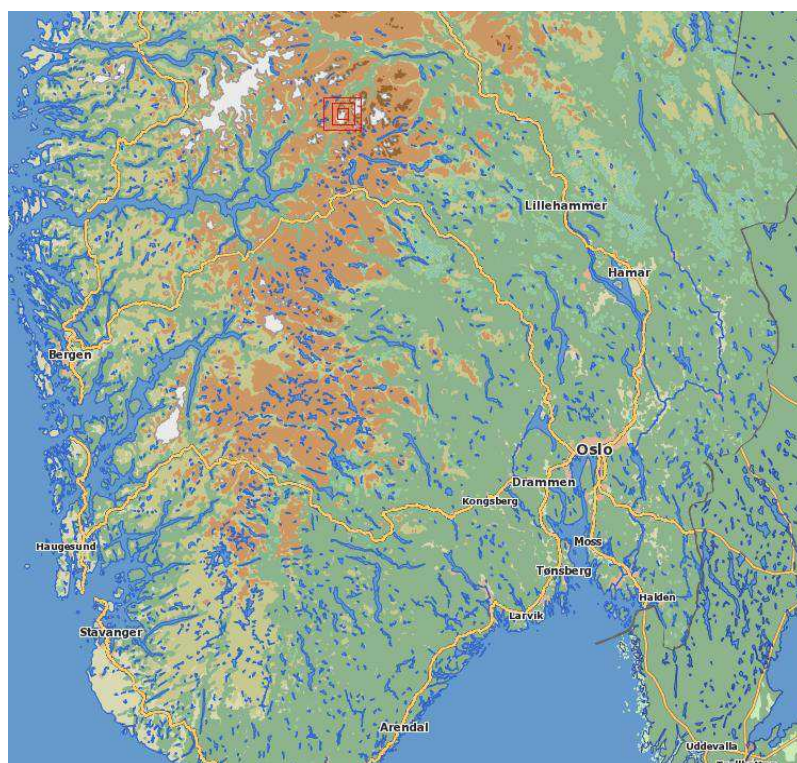
Forfatteren har vært med på Storbreen i felt og fått kunnskap og erfaring med hvordan akkumulasjons-, ablasjons- og snøtetthetsmålinger gjennomføres. Det er sett på massebalanseverdier ved ulike stakeposisjoner i (1) en tidsserie fra 1985 til 2010 og (2) en homogenisert tidsserie fra 1995 til 2010. I disse tidsseriene er det i tillegg til vinterbalanse også sett på nettobalanse og sommerbalanse ved de ulike stakeposisjonene, og en sammenligning av disse verdiene med massebalanse for hele breen og NAO-indeks. Det er imidlertid ikke foretatt en grundig analyse av faktorer som spiller inn i forhold til nettobalanse og sommerbalanse, som sommertemperatur og sommernedbør, da fokuset i oppgaven er på snøfordeling og vinterbalanse.

Et annet interessant spørsmål er hvilken betydning måleopplegget og beregningen av vinterbalansen har på den totale vinterbalansen. Det er her beregnet vinterbalanse med utgangspunkt forskjellige utvalg av sonderinger for akkumulasjonssesongen 2010, og undersøkt hvordan resultatet skiller seg fra en beregning basert på alle sonderingene. Det er brukt både tilfeldige utvalg og utvalg ut fra overflatehelning i denne analysen. Sonderingsverdiene spredning i ulike høydeintervaller i 2010 er studert, og ut fra dette er sammenheng med aspekt og helning i ulike deler av breen analysert.

2 Området

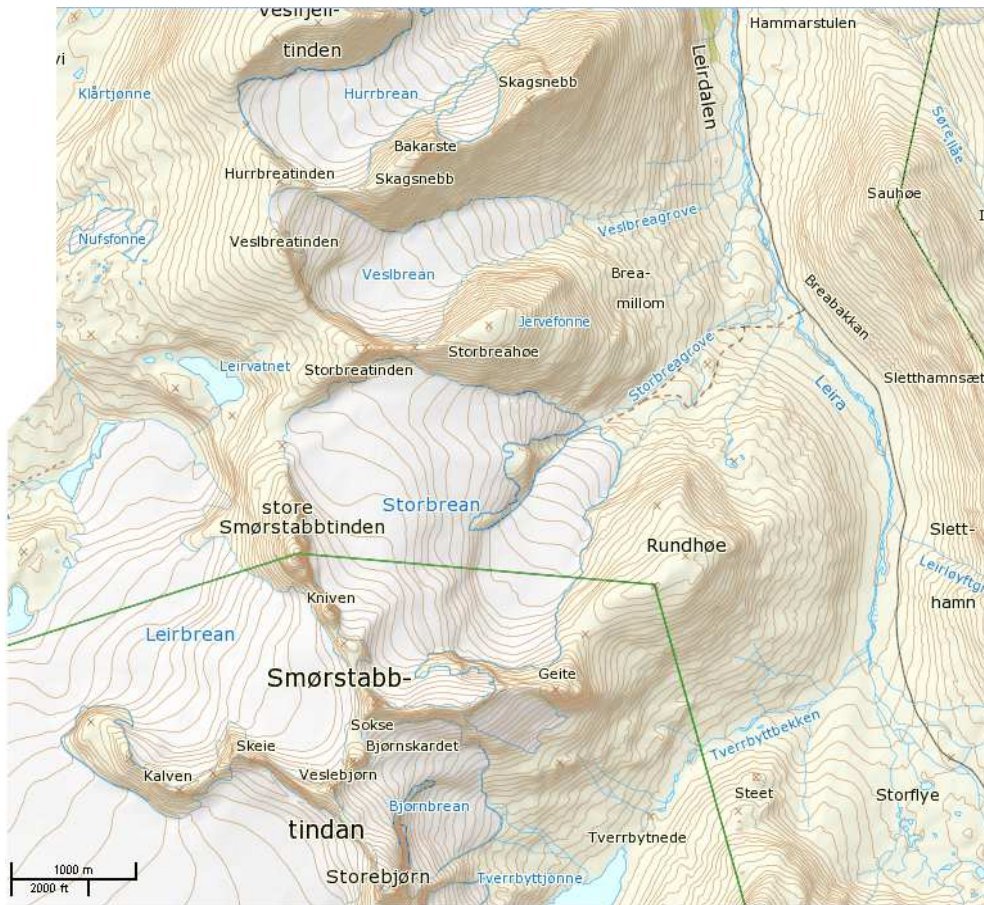
2.1 Geografi på og rundt breen

Storbreenens alpine beliggenhet (se figur 2.1) er blant noen av Norges høyeste fjelltopper sentralt i Jotunheimen i Lom kommune i Oppland, ved 61°34' nordlig breddegrad og 8°8' østlig breddegrad. Breen ligger ved fjellryggen Smørstabbtinden, med fjelltoppene Storbreatinden, Store Smørstabbtinden (2208 m.o.h.) og Rundhøe som bratte avgrensninger i hhv. nord, vest og sørøst (figur 2.2). Disse danner et skålformet bassengunderlag for breen.



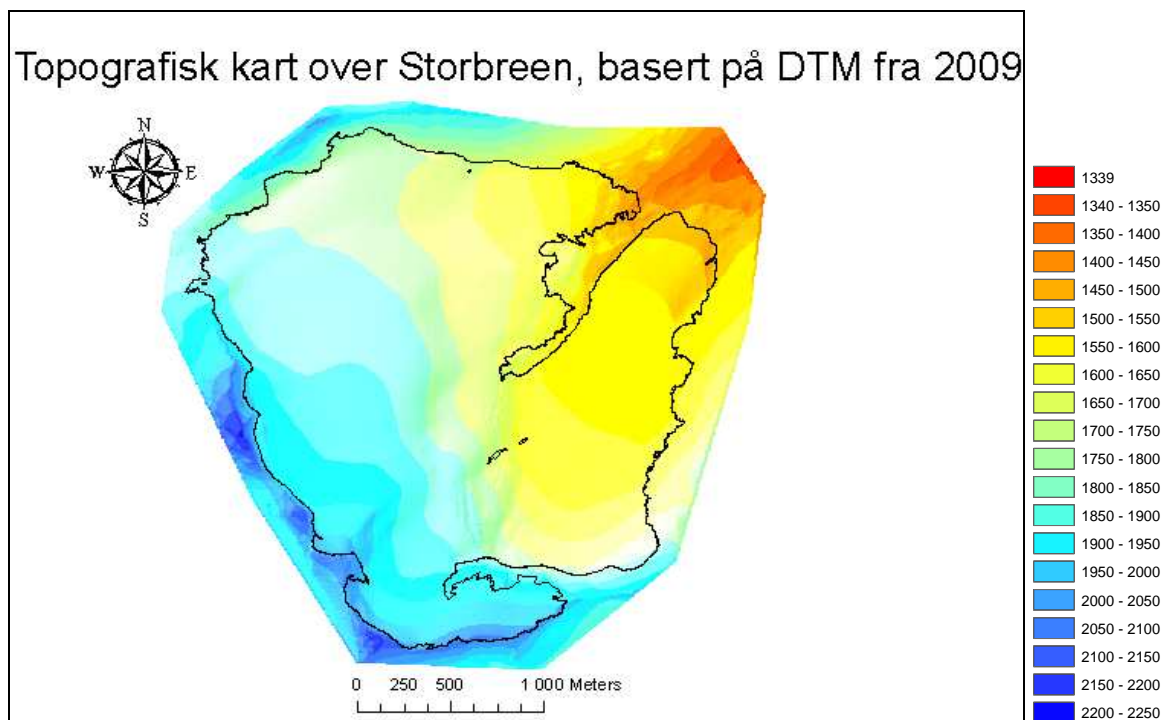
Figur 2.1: Storskala kart over Sør-Norge, der Storbreen i Jotunheimen er markert med rød firkant.

Fra brefronten ved Storbreen laveste område i nordøst, løper breens avrenning ut i elva Storbreagrova, som renner ut i den større elva Leira i Leirdalen lenger øst. Det eneste som skiller Storbreen fra en annen bre i vest, Leirbreen, er fjellryggen fra Store Smørstabbtinden til Kniven (2100 m.o.h.) og Sokse (2100 m.o.h.) i sørvest.



Figur 1.2: Topografisk kart over Storbreen og området rundt. Ekvidistanse er 20 m (Statens Kartverk, 2010)

Storbreen strekker seg fra ca. 1400 m.o.h i nordøst (se figur 2.3) til ca 2102 m.o.h. i sør og har et samlet areal på ca. 5,1 km², ifølge kart basert på flyfoto og laserskanning i september og oktober 2009 (Kjøllmoen et al., 2011). Det er to relativt flate partier på breen, ett på den lavtliggende delen i øst og sørøst fra ca. 1450 til 1630 m.o.h., og ett på den høyereliggende delen av breen i nordvest fra ca. 1700 til 1850 m.o.h. Mellom disse flatere partiene er det en bratt skråning i nordøst-sørvest retning som skiller breen. I nordøst er denne skråningen oppe i dagen som bart fjell, og i takt med breens tilbaketrekning fra starten av måleserien og fram til i dag, har andelen med bart fjell i denne skråningen økt (se figur 2.8).



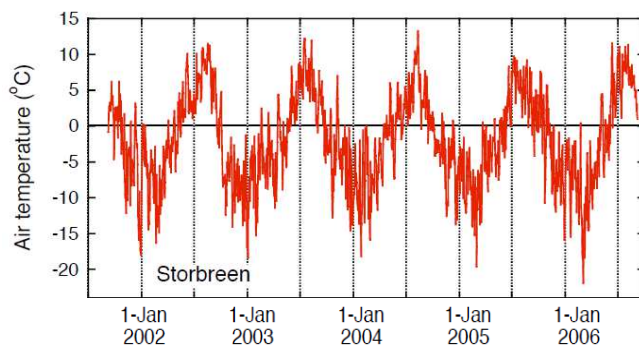
Figur 2.3: Topografisk kart (med "hillshade" - effekt med simulert belysning fra nordvest) over Storbreen basert på digital terrengmodell (DTM) fra 2009, klassifisert i 50 m høydeintervaller. Enheten i legenden er m.o.h.

2.2 Klima i området

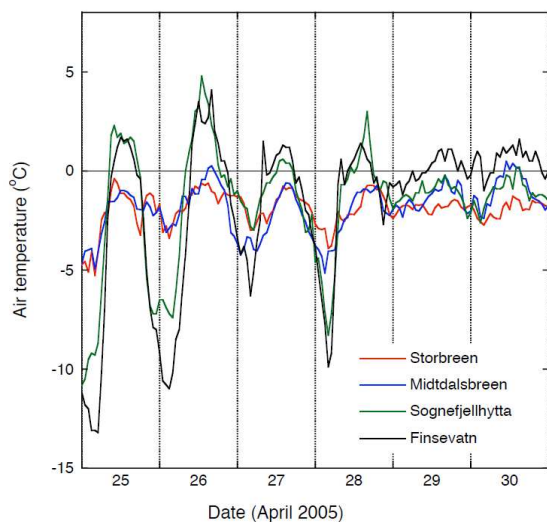
Storbreen er lokalisert litt øst for hovedvannskillet mellom øst og vest i Sør-Norge og er eksponert for nedbør fra både øst og vest (Liestøl, 1967; Andreassen og Oerlemans, 2009), men nedbøren kommer hovedsakelig fra vest (Liestøl, 1974).

Det har vært en AWS utplassert 1570 m.o.h. på Storbreen siden september 2001 (Andreassen et al., 2008b; mer detaljer om dette i del 4.5). Ifølge stasjonens målinger i perioden fra 7. september 2001 til 6. september 2006, var det en årlig lufttemperatur på ca. $-1,9^{\circ}\text{C}$ og en lufttemperatur på ca. $4,9^{\circ}\text{C}$ i perioder med smelting (Giesen et al., 2009). Figur 2.4 fra samme studie viser et mønster i lufttemperaturens årsvariasjon der døgnmiddelverdiene beveger seg fra rundt -17°C til -22°C på det kaldeste i januar – februar, til rundt $10-13^{\circ}\text{C}$ på det varmeste i juli – august. Giesen et al. (2009) har også kalkulert den adiabatisk temperaturgradienten fra temperaturobservasjonene fra AWS på Storbreen og

Midtdalsbreen. Den gjennomsnittlige og mest vanlige adiabatisk temperaturgradienten er på $6,0^{\circ}\text{C}/\text{km}$.



Figur 2.4: Daglige middelveier for lufttemperatur fra AWS på Storbreen fra 7. september 2001 til 6. september 2006 (Giesen et al., 2009).



Figur 2.5: Plottede timeverdier for lufttemperatur på Storbreen, Midtdalsbreen, Sognefjellhytta og Finsevatn fra 25. til 30. april 2005. (Giesen et al. 2009)

Døgnvariasjonen er langt lavere på Storbreen og Midtdalsbreen enn på stasjonene Sognefjellshytta og Finsevatn på dager med klar himmel, mens forskjellen er mindre når det er overskyet. 25. og 26. april 2005 ble det observert en temperaturvariasjon fra maksimum til minimum (basert på middelveier for hele timer) på hhv. ca. $4\text{--}5^{\circ}\text{C}$ og $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ på Storbreen (figur 2.5), mens variasjonen var så stor som ca. $12\text{--}13^{\circ}\text{C}$ på Sognefjellhytta (Giesen et al., 2009). På slike dager med klar himmel er det lavere vindhastigheter utenfor breene, og det bidrar til sterkere oppvarming på dagen og

sterkere nedkjøling på natten. På den hellende breoverflaten bidrar den høyere vindhastigheten til mer homogene luftmasser med mindre døgnvariasjon i temperatur.

Fra 6. september 2001 til 10. september 2006 er det svært sterk korrelasjon mellom daglige temperaturer på Storbreen AWS og daglige temperaturer ved de meteorologiske stasjonene Sognefjellshytta ($r = 0,97$) og Fokstugu ($r = 0,95$) (Andreassen og Oerlemans, 2009).

Den gjennomsnittlige årlige vindhastigheten i perioden 2001-2006 er på 3,8 m/s og 3,3 m/s i perioder med smelting. Relativ og spesifikk luftfuktighet er på hhv. 77,9 % og 3,8 g/kg i årsmiddelverdier, og hhv. 78,2 % og 5,1 g/kg i perioder med smelting. Ifølge Giesen et al. (2009) har vinden ved Sognefjellshytta to klart dominerende retninger ved ca. 250 - 260 grader (vind fra vest) og ca. 150 - 170 grader (vind fra sør-sørøst), mens det er et mer variabelt mønster ved Storbreen AWS, med stor hyppighet av vinder som går nedover der breen heller. Ifølge samme studie er de dominerende retningene ved Sognefjellshytta trolig modifiserte storskala vindretninger, mens vindretning ved Storbreen er mer preget av lokal topografi og storskala vindretninger forekommer sjeldnere.

	Annual mean		Melt period mean		Accuracy	
	S	M	S	M	day	year
<i>Meteorological quantities</i>						
Air temperature (°C)	-1.9	-1.2	4.9	5.3	0.3	0.1
Relative humidity (%)	77.9	81.9	78.2	80.8	3	1.0
Specific humidity (g kg ⁻¹)	3.4	3.6	5.1	5.3	0.2	0.1
Wind speed (m s ⁻¹)	3.8	6.6	3.3	6.0	0.4	0.1
Air pressure (hPa)	834.0	848.5	838.3	852.4	0.4	0.1
Cloud fraction	0.62	0.60	0.69	0.64	0.05	0.02
Effective cloud optical depth	16.0	11.9	—	—	10	3
Surface albedo	0.73	0.68	0.52	0.47	0.05	0.02

Tabell 2.1: Utsnitt av Tabell 2 i Giesen et al. (2009), som lister opp målenøyaktighet og meteorologiske middelerverdier basert på AWS-målinger fra 7. september 2001 til 6. september 2006 på Storbreen og Midtdalsbreen. S står for Storbreen, M står for Midtdalsbreen.

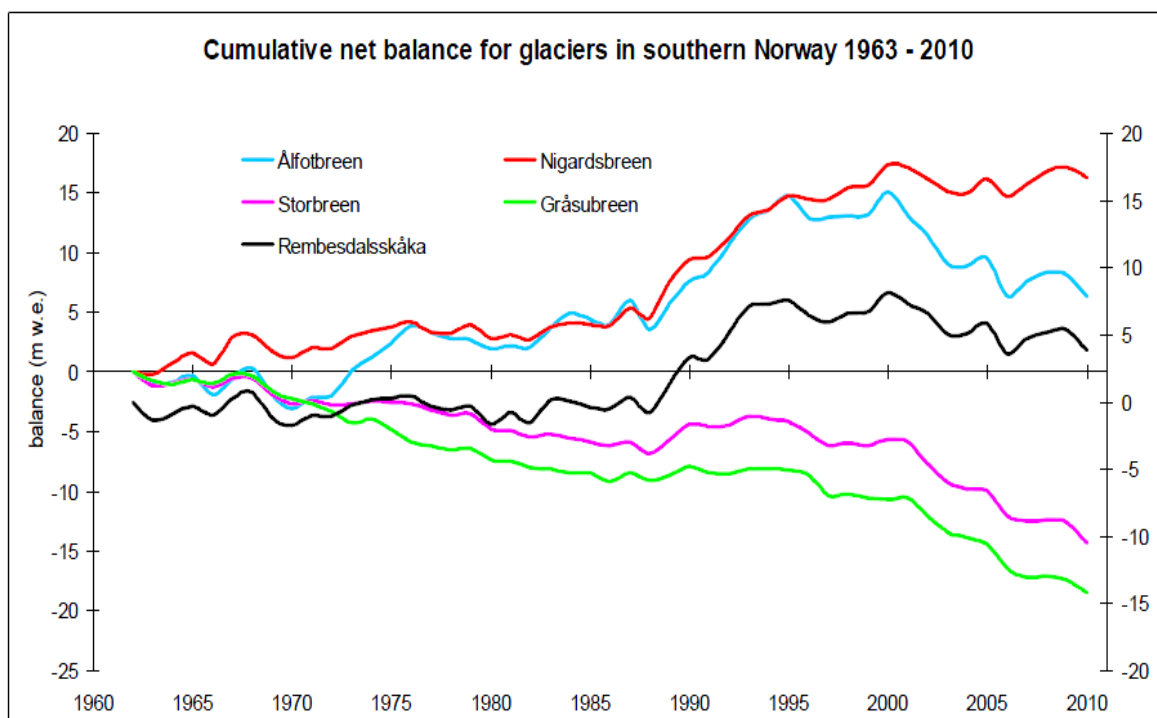
Storbreenens AWS har ikke instrumenter for måling av nedbør, bortsett fra snødybde og dermed vinternebbør. Bøverdalen og Bråtå er de nærmeste meteorologiske stasjonene hvor det måles nedbør (nedbør måles ikke på Sognefjellshytta), og ligger hhv. ca. 1,5 mil nord - øst og 4 mil nord for Storbreen. Bøverdalen har gjennomsnittlig årsnedbør for perioden 1949 - 2006 på ca. 440 mm og vinternebbør (oktober – april) på ca. 224 mm, mens Bråtå har årsnedbør på ca. 537 mm og vinternebbør på ca. 328 mm (Andreassen og Oerlemans, 2009). I nasjonal målestokk er dette svært tørre områder, og årsnedbøren blir langt høyere når man beveger seg til stasjonene lenger vest, f.eks Hafslo (1032 mm/år), Briksdal (1351 mm/år) og Sogndal (1525 mm/år).

2.3 Glasiologi og massebalanse

Den alpine breen Storbreen har elementer av både dalbre og botnbre, og kan klassifiseres som en kort dalbre eller kombinert botnbre (Liestøl, 1967).

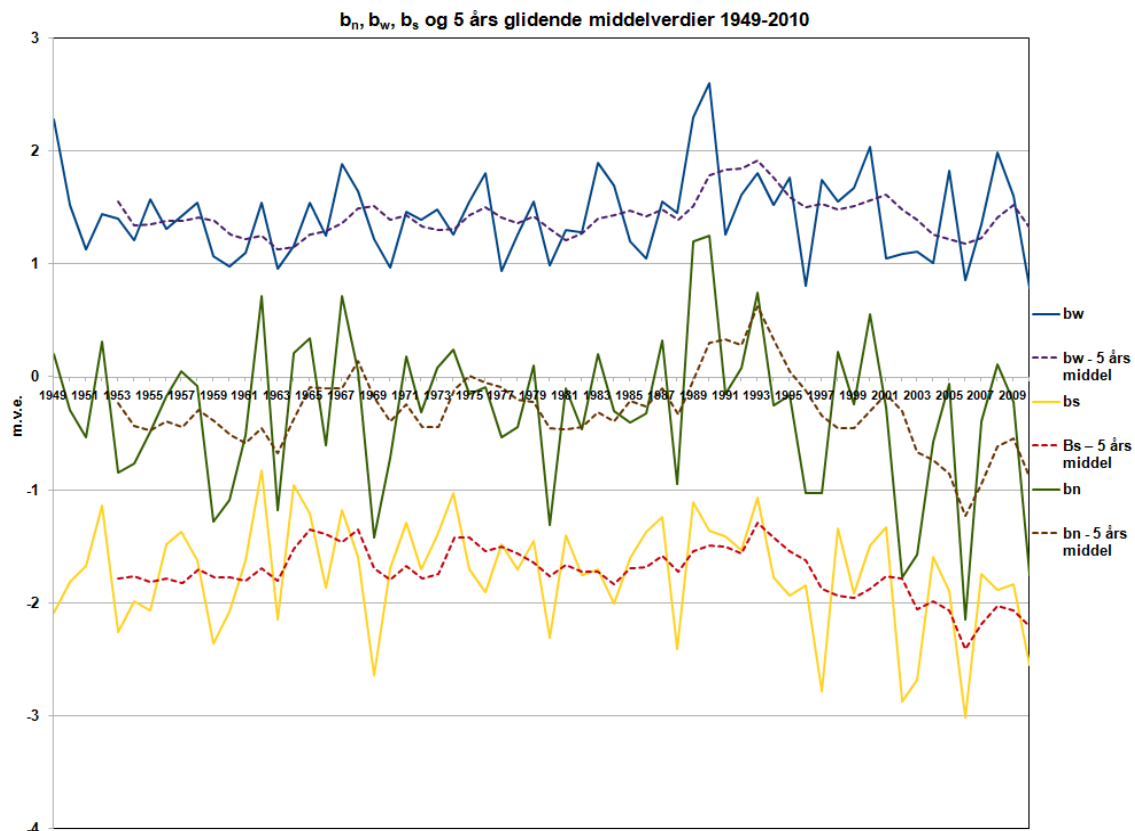
Man kan se Storbreen i sammenheng av et øst - vest rettet massebalansetransekt i Sør-Norge, fra de østligste breene i Jotunheimen til de vestligste breene på vestlandskysten, slik det er gjort i Andreassen et al. (2005). Her fant man et mønster i observasjonene der maritime breer med relativt mye massetilskudd i form av vinternebbør, har en brattere massebalansegradient enn breene lokalisert lenger øst i tørrere og mer kontinentale omgivelser, inkludert Storbreen. De maritime breene med stor massebalansegradient, f.eks Ålfotbreen, Rembesdalskåka og Nigardsbreen, hadde generelt en økning i nettobalanse fra årene 1962 til 2000, mens de kontinentale breene i Jotunheimen, Storbreen, Hellstugubreen og Gråsubreen, fikk redusert nettobalanse i denne perioden. I årene fra 1989 til 1995, en periode med høy vinternebbør i Sør-Norge og positiv NAO-indeks (figur 6.1), hadde alle målte breer i Norge unntatt den nordligste, Langfjordjøkelen i Finnmark, positiv nettobalanse. Fra 2001 til 2005 hadde alle breene NVE måler negativ kumulativ nettobalanse (Andreassen et al., 2005), mens det fra 2005 til 2010 har

vært en mer varierende utvikling med fortsatt reduksjon for Storbreen og Gråsubreen i øst og noe økning for Nigardsbreen lenger vest (figur 2.6).



Figur 2.6: Utvikling i kumulativ massebalanse 1963-2010 for Storbreen og de fire andre breene: Gråsubreen, Rembedalskåka, Nigardsbreen og Ålfotbreen (Kjøllmoen et al., 2011)

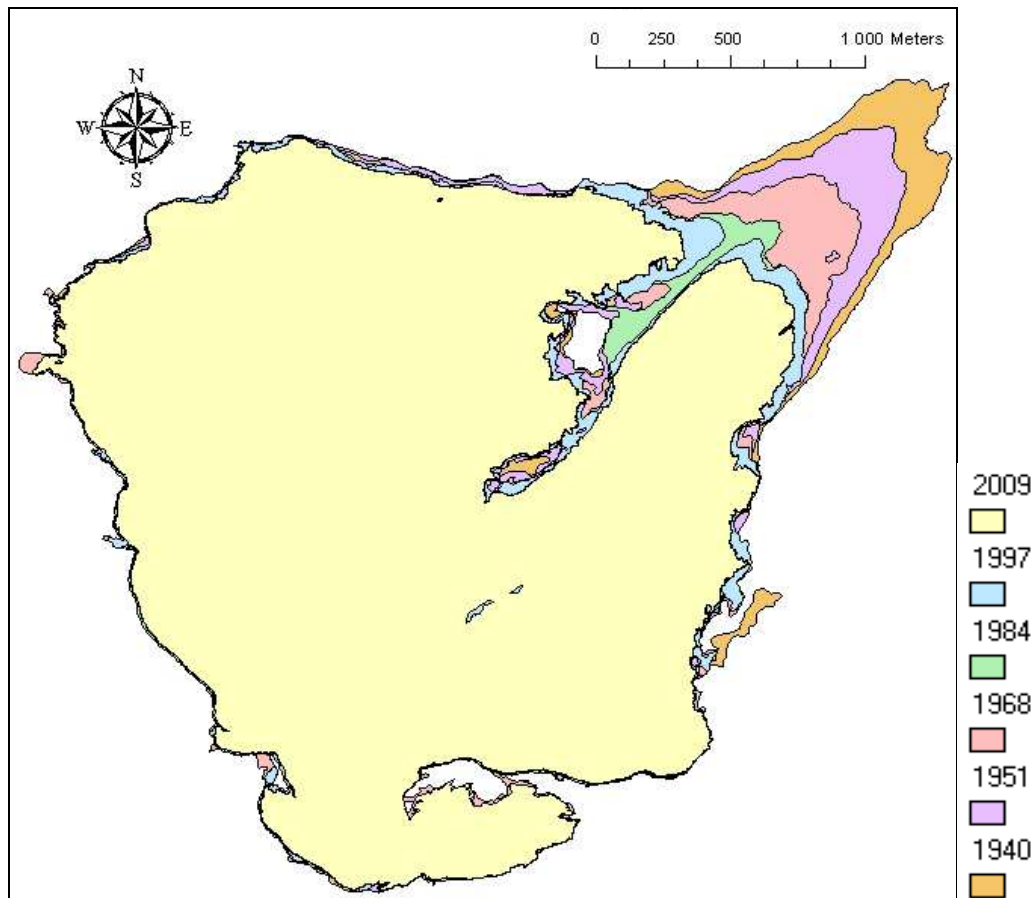
Figur 2.7 viser Storbreens utvikling i vinterbalanse, sommerbalanse og nettobalanse gjennom hele observasjonsperioden. Kurvene for glidende 5 års middelerverdier for vinterbalanse og nettobalanse viser en relativt flat tendens 1949 – 1989. Økningen i vinterbalanse (på rundt 0,5 m.v.e.) og nettobalanse 1989 – 1995 er tydelig på kurvene for glidende 5 års middelerverdier, mens kurven for sommerbalanse er ganske flat også i de årene. Sommerbalansen viser en relativt flat tendens fra 1949 til 1995, og deretter en nedgang på rundt 0,5 m.v.e. fram til 2010. 1995 – 2010 gikk også vinterbalansen ned igjen fra økningen 1989 – 1995. Dermed, med parallell nedgang i både b_w og b_s , kan det av kurven for glidende 5 års middelerverdi, sees en nedgang i nettobalanse på rundt 1 m.v.e. 1995-2010.



Figur 2.7: Plott for vinterbalanse, sommerbalanse og nettobalanse, og 5 års glidende middelerverdier for disse gjennom perioden 1949-2010.

Storbreens tilbakegang kan også sees ut fra tilgjengelige kart og høydemodeller fra 2009, 1997, 1984, 1968, 1951 og 1940, som i figur 2.8, og som det er gjort i Andreassen et al. (2008a). Figuren illustrerer at det har vært en arealmessig tilbakegang gjennom hele perioden og mellom alle suksessive år med ny høydemodell. Fra 1940 til 2009 har brefronten trukket seg tilbake ca. 1 km, og størst er tilbakegangen mellom de eldste kartene, dvs. fra 1940 til 1951, fra 1951 til 1968 og fra 1968 til 1984. Ifølge beregninger av Andreassen (1999) ble breens areal fra 1940 til 1997 redusert med 0,6 km², fra 6,0 til 5,4 km². Basert på høydemodellene avledet fra kartene fant samme studie en økning i breens gjennomsnittlige høyde over havet på 25 m, samt en økning i breens helning på 2°. Fra 1984 til 1997 ble det også registrert en økning i areal i et høydeintervall fra ca. 1800 til 1950 m.o.h. Ifølge Kjølmoen et al. (2010) viser kartene fra 2009 og 1997 en reduksjon i areal på ca 0,2 km² fra 1997 til 2009.

Storbreens tilbaketrekning 1940-2009

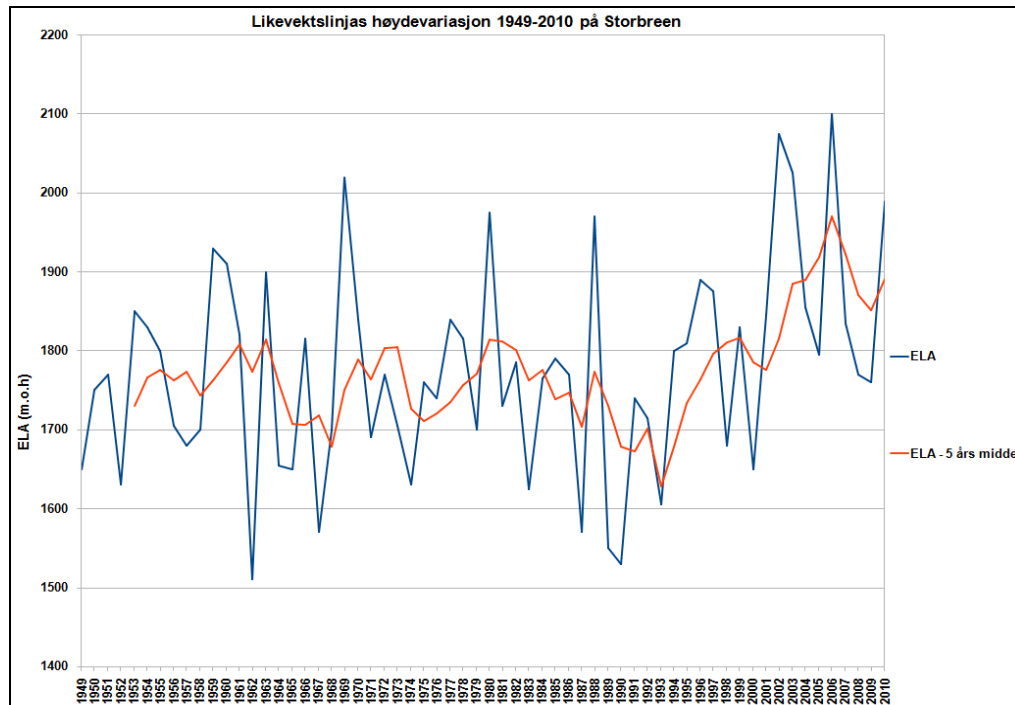


Figur 2.8: Overlagte kartlag basert på høydemodeller fra 2009, 1997, 1984, 1968 og 1951. Figuren illustrerer breens arealmessige tilbaketrekning.

I motsetning til mer maritime breer, f.eks. Ålfotbreen, så er det i Storbreens massebalanseserie en sterkere korrelasjon mellom nettobalanse og sommerbalanse enn nettobalanse og vinterbalanse, ifølge Nesje et al. (2003) på hhv. $r^2 = 0,66$ og $r^2 = 0,51$ for serien fram til 1998. Modellberegninger av Andreassen et al. (2008b) tyder på at en økning i lufttemperaturen på 1°C må kompenseres av en økning på 30 prosent i vinternedbør for at Storbreen ikke skal minke.

Ifølge beregninger av likevektslinjas høyde (ELA), har denne variert en del gjennom perioden 1949-2010 (figur 2.9), fra ca 1510 m.o.h. på det laveste i 1962, da ablasjonen var rekordlav som følge av en spesielt kald sommer (Liestøl, 1967), til høyere enn alle punkter på breen (>2100 m.o.h.) eksklusivt i 2006. Som figuren

illustrerer, så har ELA en ganske flat trend fra 1949 til 1980-tallet, da den 5-årige ELA-middelverdi generelt har ligget mellom 1700 og 1800 m. Deretter har det vært en markant stigning til rundt 1900 m.

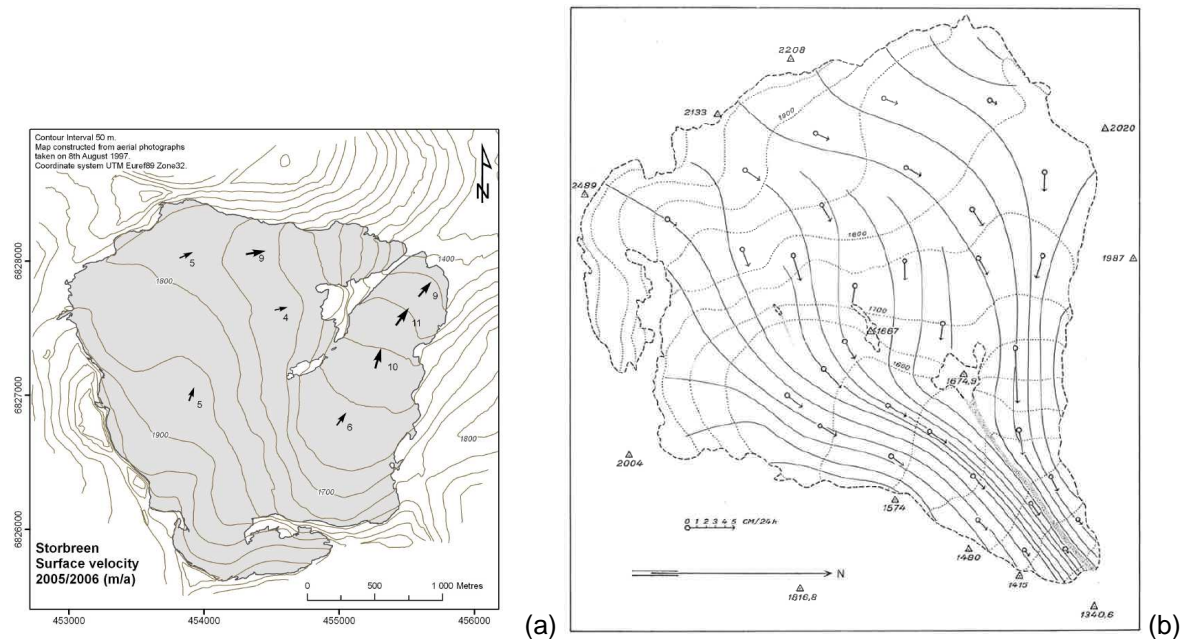


Figur 2.9: Høydevariasjon i ELA og 5 års glidende middelverdi for ELA gjennom perioden 1949-2010 på Storbreen. I 2006, da ELA var høyere enn alle punkter på breen (>2100 m.o.h.), er ELA satt til 2100 m.o.h. i diagrammet.

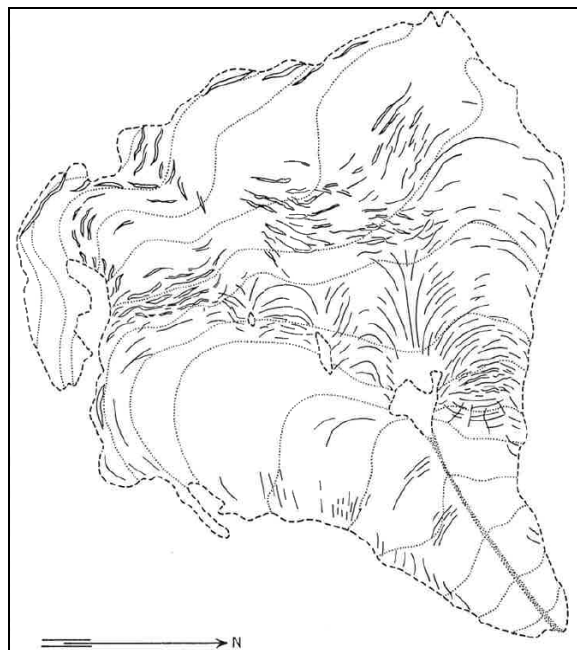
Målinger av overflatebevegelse på Storbreen (se figur 2.10 (a) etter Kjøllmoen et al., 2007) viser relativt lav hastighet høyt på breen, med ca. 5 m/år rundt 1800-1900 m.o.h., og høyest hastighet på ca. 11 m/år, ved ca 1500 meters høyde (Kjøllmoen et al., 2007). Figur 2.10 (b) fra Liestøl (1967) illustrerer strømlinjene og en relativt lav hastighet i særlig de øverste og helt nederste delene av breen sammenlignet med de midtre delene rundt 1600-1800 m.o.h.

Når det gjelder akkumulasjon, så er det ifølge Liestøl (1967) en relativt jevn snøfordeling på Storbreen sammenlignet med de isfrie områdene rundt. Ettersom de øvre delene av breen er kaldere enn de lavere, vil en noe større andel av nedbøren falle som snø her. I forhold til snøfordelingen bemerker Liestøl (1967) at mye snø vil blåse ned og samle seg opp i sprekker på de deler av breen hvor det er

mye bresprekker. Figur 2.11 illustrerer bresprekksystemet på Storbreen basert på flyfotografering i 1955. Flere kjennetegn fra bresprekkartet er gjenkjennelig i dag, f. eks det store antallet sprekker på den nordlige delen av breen og på høyre side av dagens brefront.



Figur 2.10: (a) Overflatehastighet ved 8 forskjellige punkter på Storbreen (Kjøllmoen et al., 2007). (b) Kart over strømlinjer og staker hvor hastighet ble målt. Pilenes lengde representerer hastigheten (Liestøl, 1967).



Figur 2.11: Kart fra over bresprekksystemet på Storbreen (Liestøl, 1967)

3 Teori

3.1 Massebalanse, akkumulasjon og ablasjon

Akkumulasjon omfatter alle prosesser som tilfører en bre masse, og innebærer hovedsakelig snøfall, men også refrysing av regn, snøras, snødrift og rimdannelse defineres som akkumulasjon. Refrysing av smeltevann er dermed ikke akkumulasjon i denne betydning, ettersom masse ikke blir tilført breen. Hvis vinden har en dominerende retning mot en fjellside eller skråning (med eller uten is), oppstår en lo- og lesideeffekt der snølaget tynnes på losiden, mens et tykt snølag kan bygge seg opp på lesiden. Snøskavler kan bygge seg opp og rase nedover lesiden.

Ablasjon refererer til alle prosesser som bidrar til å fjerne snø og is fra breen, og omfatter smelting, fordamping, sublimasjon, kalving og vindablasjon (Benn og Evans, 2007).

Massebalansen på en bre er definert som differansen mellom den massen som tilføres en bre ved akkumulasjon, og den massen som fjernes fra en bre ved ablasjon gjennom et bestemt tidsrom, som er et år når det gjelder årlig massebalanse. I områder slik som Norge, hvor hhv. akkumulasjonen og ablasjonen i all hovedsak kommer i en klart definert vinter- og sommersesong, opereres det med begrepene vinterbalanse (b_w) og sommerbalanse (b_s) (Cogley et al., 2011), som til sammen utgjør nettobalansen (b_n) etter formelen:

$$b_n = b_w + b_s \quad (\text{Formel 1})$$

b_w er da det samlede bidraget til massebalansen i løpet av vintersesongen, mens b_s er det samlede bidraget til massebalansen i løpet av sommersesongen.

Ettersom breis, firn og snø varierer i tetthet, er det praktisk å regne massebalanse i meter vannekvivalenter (m.v.e). Man får da den *spesifikke massebalansen*. Vann

har en tetthet på ca. 1000 kg/m^3 , mens nyfallen snø, firn og breis har en tetthet på hhv. $50\text{-}200 \text{ kg/m}^3$, $400\text{-}830 \text{ kg/m}^3$ og $830\text{-}910 \text{ kg/m}^3$ (Benn og Evans, 2007).

Ved å plote massebalanseverdier (vinter-, sommer- og/ eller nettobalanse) og høyde for punkter opp gjennom breens forskjellige høydenivåer, kan massebalansegradienten studeres. En bre sies å ha en bratt massebalansegradient hvis det er store endringer i massebalanse med høyde, slik f. eks Nigardsbreen har (Benn og Evans, 2007) .

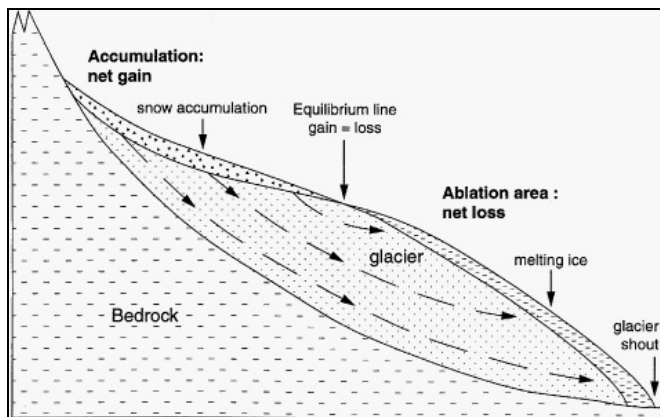
3.2 Glasiologi

En bre består av snø og is, og dannes der akkumulasjonen over flere tiår er større enn ablasjonen. Når suksessive akkumulasjonslag bygges opp over flere år, blir det høyere trykk og mindre luftfylte porerom, slik at snø først transformeres til firn, og deretter breis.

Akkumulasjonsområdet er den delen av en bre som legger på seg snø- eller ismasse i løpet av balanseåret. Ablasjonsområdet er den delen av en bre hvor det er netto massetap av snø og is gjennom balanseåret. Likevektslinjen (ELA) er grensen mellom akkumulasjonsområdet og ablasjonsområdet.

For at en bre skal kunne opprettholde en stabil geometri, med konstant ELA og høydenivå på akkumulasjonsområdet og ablasjonsområdet, må det dermed foregå en intern massetransport om ELA, som vist for en typisk dalbre på figur 3.1, der ismasse transporteres fra akkumulasjonsområdet til ablasjonsområdet i konkave strømlinjer. Den høyeste hastigheten er som regel ved ELA, og avtar med avstand fra ELA oppover og nedover på breen. Slik bevegelse er et plastisk sig, som skyldes at is er et relativt svakt krystallinsk stoff og lett deformeres av sin egen vekt, slik at iskrystallene beveger seg i forhold til hverandre (intergranulær forskyvning) eller det foregår bevegelse inne i hver enkelt iskrystall (intragranulær forskyvning) , jf. Sulebak (2007). Graden av deformasjon øker med dybde og temperatur, og på

norske fastlandsbreer er det vanlig med en hard og sprø skorpe de øverste 30-40 m, hvor det lett dannes sprekker som følge av trykk-, strekk- eller skjærspenninger når isen er i bevegelse. Bresprekker oppstår f.eks i brefall (fordi hastigheten øker), langs kanter av breen som presser mot fjellveggen, og når isen brer seg utover eller passerer forhøyninger i terrenget. I kaldere områder, og dermed også høyere opp på en bre, strekker den sprø skorpen seg dypere ned.



Figur 3.1: Tverrsnitt av typisk dalbre (Hambrey og Glasser, 1978)

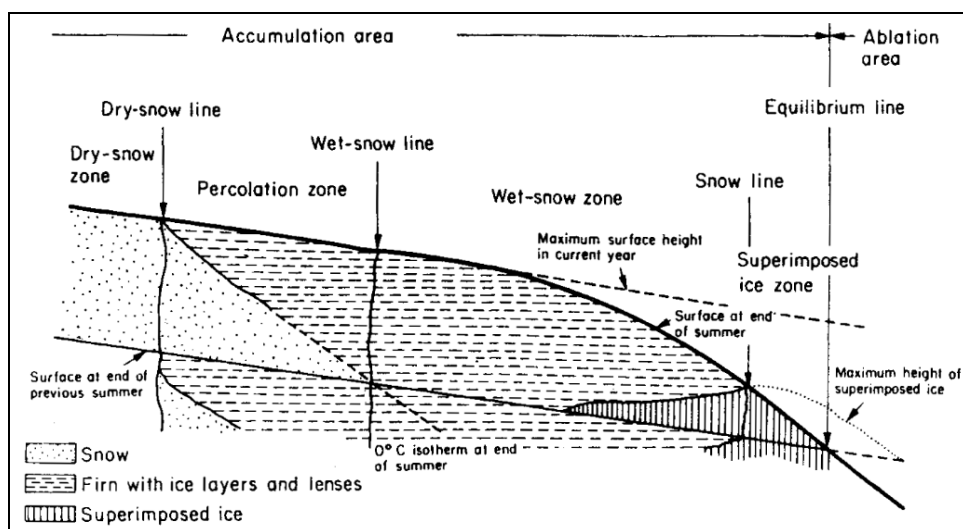
Klima er sjelden konstant, så ELA vil som regel variere fra år til år, og det er vanlig at en bres front trekker seg tilbake eller rykker frem med varierende klima. En mindre bres geometri vil endre seg raskere enn en større bres geometri som følge av en klimaendring, og tiden det tar før en bre har tilpasset seg et nytt klima kalles reaksjonstiden (Cogley et al., 2011)

Der en bresåles temperatur er ved trykksmeltepunktet kan det også foregå brebevegelse i form av basalglidning, der bresålen glir på et tynt vannlag. Trykksmeltepunktet reduseres med økende trykk ($0,072^{\circ}\text{C}$ per millioner pascal), og blir dermed lavere dypere ned i bremassen (Benn og Evans, 2007).

Det er vanlig å klassifisere breis ut fra temperaturregime, der temperert is definerer is ved trykksmeltepunktet, og såkalt kald is er under trykksmeltepunktet. Klassifiseringen er utvidet til å gjelde breer, slik at tempererte breer er ved trykksmeltepunktet over hele breen, polare breer er under trykksmeltepunktet over

hele breen, mens subpolare eller polythermale breer generelt har kald is ved kantene og temperert is i indre områder (i dybden). Dette er imidlertid ofte forenklet, og utbredelse av temperert is kan variere mye både tidsmessig og forskjellige steder på en bre (Benn og Evans, 2007).

Det er også vanlig å inndelegne en bre etter soner, og dette ble først gjort av Benson (1961) og Müller (1962). Etter Paterson (1994), kan det deles inn i fire soner i akkumulasjonsområdet, samt ablasjonsområdet (figur 3.2). Inndelingen beskriver situasjonen ved slutten av et balanseår (sensommer i Norge).



Figur 3.2: Soneinndeling av en bre (Paterson 1994)

Tørrsnøsonen er øverst, og her er temperaturen under smeltepunktet hele året slik at det ikke foregår smelting og det ikke er innvirkning av smeltevann. Metamorfosen til is skjer her langsomt. Tørrsnøsoner forekommer kun i svært kalde områder, som Antarktis og Grønland, med temperaturer under -25°C (Benson, 1961).

Tørrsnølinjen markerer overgangen til perkolasjonssonen, hvor det foregår noe overflatesmelting og smeltevann perkolerer nedover i snølaget. Her refryser vannet til horisontale islinser. Lenger nedover blir perkolasjonssonen dypere til våtsnølinjen markerer overgangen til våtsnøsonen, hvor all snøen fra årets akkumulasjonssesong befinner seg ved smeltepunktet. Lenger ned, i sonen med påfrosset is, er det så mye refryst smeltevann at dette, istedenfor å forekomme som

islinser, har dannet en kontinuerlig masse. Snølinjen markerer grensen mellom våtsnøsonen og sonen med påfrosset is. Likevektslinjen ligger på det nederste punktet i sonen med påfrosset is. I områder uten sone med påfrosset is, f. eks tempererte steder, er likevektslinjen på samme punkt som snølinjen.

3.3 Metode for måling og beregning av overflatemassebalanse

Måten å beregne overflatemassebalanse har endret seg lite gjennom årene, og beregnes vanligvis ved den stratigrafiske metode (Østrem og Brugman, 1991). Det innebærer at man beregner nettobalanse (b_n) som forskjellen på to etterfølgende sommeroverflaters (SO) høyde, dvs. breoverflatens laveste nivå gjennom året, på slutten av ablasjonssesongen før akkumulasjonen overgår ablasjonen. Dette tidspunktet, når ablasjonsmålingene gjennomføres, er vanligvis i september eller oktober. Vinterbalansen kan beregnes ved å måle høydedifferensen mellom et års maksimale snødybde (som man kan kalle snømaksimum), og det foregående års sommeroverflate. Den maksimale snødybden finner sted før ablasjonen overgår akkumulasjonen, og tidspunktet for disse akkumulasjonsmålingene er vanligvis i april eller mai. Når b_n og b_w er kjent, kan sommerbalansen (b_s) beregnes ut fra formel 1 (del 3.1).

Smelting etter ablasjonsmålingene kan forekomme i varme perioder sent på høsten. Dette observeres ofte på lavere deler av breer som strekker seg over store høydeintervaller, slik som Engabreen og Nigardsbreen (Kjøllmoen et al., 2005). Det kan også forekomme nysnø før ablasjonsmålingene, og denne kan ofte lett måles og identifiseres siden sommeroverflaten som regel har mye høyere tetthet, også i akkumulasjonsområdet. Både slik avvikende nysnø og smelting regnes av praktiske grunner som del av neste års vinterbalanse.

For å måle relativ endring i overflatens høyde mellom etterfølgende sommeroverflater og mellom sommeroverflate og snømaksimum, benyttes i dag ett nettverk av stålstaker, som festes ved å bore hull i isen og feste stakene ned i

hullet. På mindre alpine breer ($>20 \text{ km}^2$), slik som Storbreen, er det vanlig at staker plasseres i et mønster som gir en mer eller mindre jevn fordeling utover overflaten (Østrem og Brugman, 1991). Antall staker som benyttes varierer med breens størrelse. Mindre breer har generelt høyere staketetthet. 5-15 staker er typisk på norske breer (Andreassen et al., 2005). Hvor mange stakepunkter som måles på Storbreen varierer noe fra år til år, bl.a. annet pga værforhold, overflateforhold og sikkerhetshensyn (fare for sprekker, snøbroer etc.). I de senere år har det vært vanlig å måle ved syv staker. Figur 3.3 viser stakepunktene beliggenhet på Storbreen i 2003.

Et problem med ablasjonsmålingene er at stakene kan smelte ut eller blir skjeve og dermed ikke kan måles for ablasjon. På den lavere delen av Storbreen skjer dette ofte, noe som gjør det viktig å bore stakene dypt nok ned i breen her, dvs. ca. 5 m dypt ifølge Liestøl (1967). Det er vanlig praksis å observere og måle staker på Storbreen også om sommeren (i juli eller august), og bore om de staker som eventuelt står i fare for utsmelting. En annen feilkilde er at stakene i firnområdet kan synke nedover i firnen (Østrem og Haakensen, 1999). For å redusere nedsynkningen festes ofte treplugger, plater etc. til stakens nedre ende.

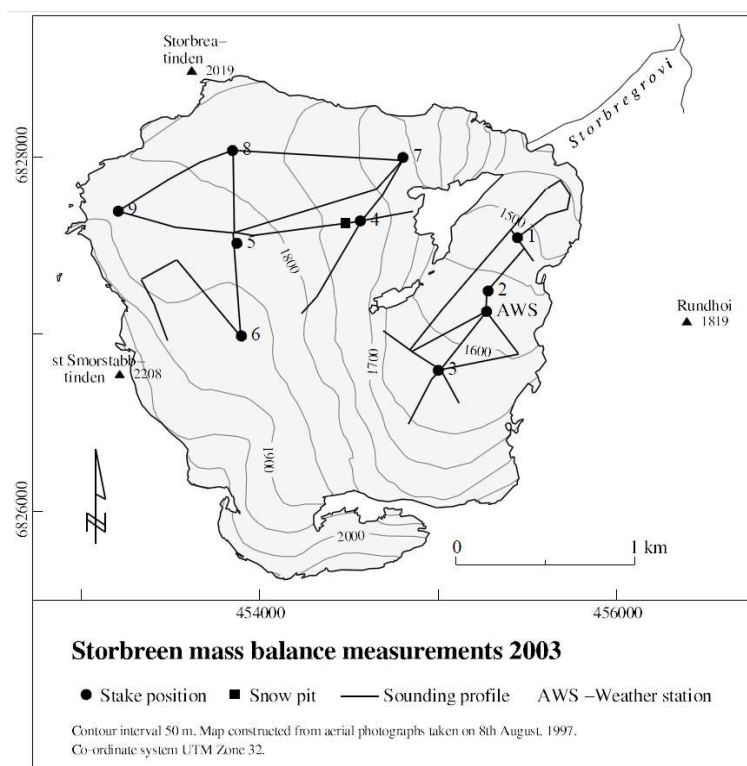
Måling av akkumulasjonen gjøres ved å foreta dybdesonderinger med metallstenger i et antall punkter på breen ved tidspunktet for snømaksimum, og disse målingene har ofte blitt testet og supplert med stakemålinger. For å fastsette og bruke sonderingspunktene geografisk, benyttes i dag GPS. En feilkilde ved sondering er at refrysing av smelte vann kan danne islag i snøprofilen som kan være vanskelig å identifisere og/eller penetrere med sonderingsstengene (Østrem og Haakensen, 1999).

Typisk for norske breer er 100–150 sonderinger på hver bre (Andreassen et al., 2005), og for Storbreen er det i gjennomsnitt 153 sonderinger hver akkumulasjonsmåling i de 40 årene med tilgjengelige akkumulasjonskart fra 1951 til 2010. Som figur 6.11 og tabell 6.4 viser, så har dette variert mye gjennom måleserien.

For å tetthetskorrigere akkumulasjonsmålingene, tas det nå for tiden snøprøver i 1-2 snøprofiler på Storbreen. Ifølge Liestøl (1967) var det på den tiden vanlig med flere snøprøver. Antallet var avhengig av snøens homogenitet, og i et år (f. eks 1953) med lite tetthetsvariasjon fra øvre til nedre bre, kunne det være tilstrekkelig med tre snøgrop. En snøgrop graves ned til sommeroverflaten, og det tas ut et antall snøprøver (tilstrekkelig til å dekke hele snøprofilen ned til sommeroverflaten) med en ofte ca. 20-50 cm høy, hul sylinder med kjent volum. Snøprøvene veies med fjærvekt, slik at vannverdi kan beregnes ut fra masse og volum. Middeltettheten finnes ved sammenhengen:

Middeltettheten finnes ved sammenhengen:

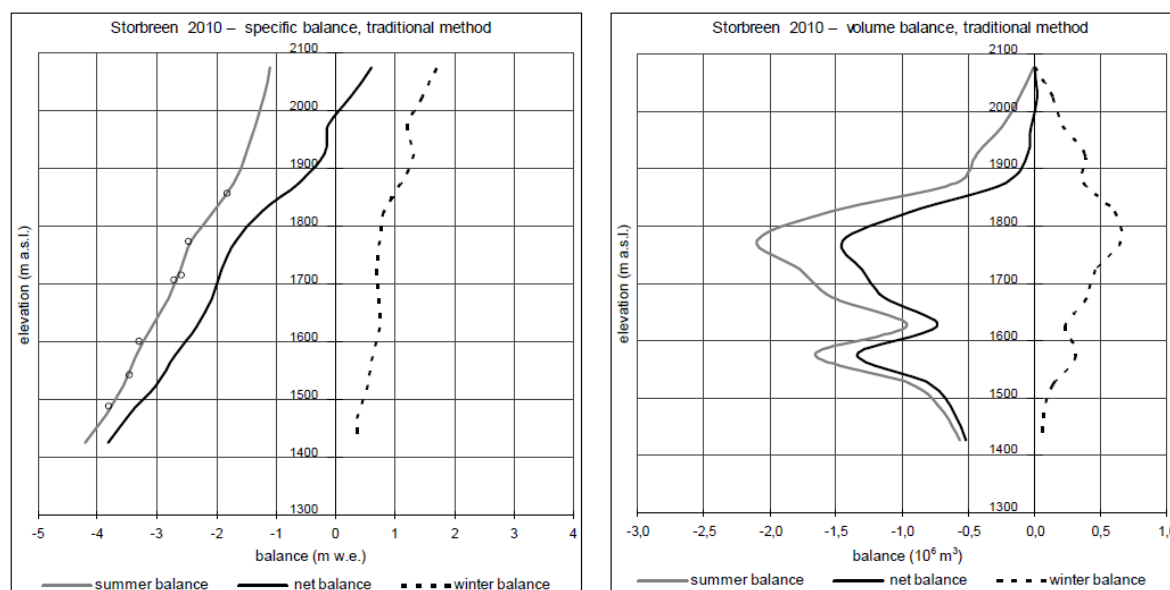
$$\text{middeltetthet} = \text{summert vannverdi} / \text{snødybde}$$



Figur 3.3: Kart over Storbreen som inkluderer de mest sentrale stakepunktene 1-8 gjennom perioden 1985-2010, hvis massebalanseverdier er listet opp i Tabell 6.1. (NVE, 2003)

Ved beregning av sommerbalanse blir breisen tetthetskorrigert ved en antagelse om istetthet på 900 kg/m³, mens det regnes med en firntetthet på 600 kg/m³ der

sommeroverflaten består av firn, noe som er vanlig i øvre deler av Storbreen som ved stake 6.



Figur 3.4: Venstre: Massebalansediagram for 2010 der spesifikk nettobalanse, vinterbalanse og sommerbalanse er plottet. Høyre: Massebalansediagram med plottet volumbalanse (Kjøllmoen et al., 2011).

For å beregne total årlig massebalanse for hele breen er den tradisjonelle metoden å plote stakepunktens spesifikke b_w - og b_s -verdier og deres høyde i et diagram (som i figur 3.4). Grafene tegnes enten som en skjønnsmessig trukket kurve eller som gjennomsnittet for alle målinger innen hvert høydeintervall (Andreassen, pers.medd). Ut fra grafen kan snittverdier for 50 meters høydeintervaller estimeres. b_n kan beregnes ved å summere b_w - og b_s - grafene (Andreassen et al., 2005). Akkumulasjonen på Storbreen beregnes i dag ut fra sonderingenes gjennomsnittsverdi i hvert 50 meters høydeintervall (Kjøllmoen et al., 2011). Når arealfordelingen mellom høydeintervallene er kjent, kan volumbalansen for hvert høydeintervall estimeres ved å multiplisere spesifikk b_n med arealet.

Fram til 1980-årene ble det laget planimetrisk kart over akkumulasjon og ablasjon basert på observasjonene. Akkumulasjon og ablasjon ble beregnet for ulike høydeintervall på 50 eller 100 m, og b_n -, b_w -, og b_s -verdier ble plottet i grafer basert på de planimetrisk kartene (Andreassen et al., 2005).

3.4 NAO-indeks

Den nord-atlantiske oscillasjon (NAO) er et værmønster som ofte dominerer vær og klima over Nord-Europa om vinteren. Fenomenet karakteriseres av motfasende trykksvingninger mellom Island og Azorene, der nedbør, temperatur og trykket ved havnivå følger oscillasjonen (Nesje et al., 2000). Når NAO-indeksen har positiv verdi innebærer oscillasjonen et høytrykkssenter ved Azorene og et lavtrykkssenter over Island. Da svinger jetstrømmen nordover over Atlanterhavet, og milde og fuktige luftmasser bringes mot Nord-Europa (Hurrell et al., 2003). I motsatt tilfelle, ved negativ NAO-indeks, er lavtrykkssenteret over Azorene og høytrykkssenteret over Island, noe som innebærer tørrere og kaldere vær i Nord-Europa som følge av at jetstrømmen går i en mer øst-vestlig retning.

Det er en sterk korrelasjon ($r^2 = 0,59$) mellom NAO-indeks og vinternedbør (desember til mars) i Bergen fra 1865 til 1998 (Nesje et al., 2000). Positiv NAO-indeks vil dermed bidra til å øke nedbørsmengdene som kommer inn over norske breer fra vest i akkumulasjonssesongen, og massebalanseseriene fram til 1998 for vestlige maritime breer slik som Ålfotbreen ($r^2 = 0,42$) og Nigardsbreen ($r^2 = 0,26$), viser sterk korrelasjon mellom vinterbalanse og NAO-indeks fra oktober til april (Nesje et al., 2000; Nesje og Dahl, 2003). For de mer kontinentale breene lenger øst, som er mindre eksponert for nedbør fra luftmassene fra vest, slik som Storbreen ($r^2 = 0,21$), Hellstugubreen ($r^2 = 0,22$) og Gråsubreen ($r^2 = 0,21$), er korrelasjonen mer moderat, men også her er den tydelig. Korrelasjonen er enda sterkere mellom vinterbalanse på disse breene og NAO-indeks fra desember til mars. Da er r^2 0,51 for Ålfotbreen, 0,32 for Nigardsbreen, 0,29 for Storbreen, 0,30 for Hellstugubreen og 0,24 for Gråsubreen (Nesje et al., 2000).

3.5 Interpolasjon ved kriging

I analysen er det gjennomført lokale stokastiske interpolasjoner ved metoden kriging. Kriging er en teknikk basert på teorien om at romlig variasjon av en variabel er basert på tre komponenter: en strukturell komponent, en stokastisk, tilfeldig komponent og støy, som framstilt i ligningen:

$$Z(x) = m(x) + \epsilon'(x) + \epsilon''$$

(formel 2)

der $m(x)$ er en deterministisk funksjon (f.eks. trend) og ϵ' og ϵ'' er hhv. stokastiske komponenter og støy (Burrough og McDonnell, 2009). Den stokastiske komponenten kan beskrives som semivariansen av variabelen, som i ligningen:

$$\gamma_h = \sum_i^{n-h} \frac{(X_i - X_{i+h})^2}{2n}$$

(formel 3)

H beskriver avstanden fra det interpolerte punktet, mens semivariansen beskriver romlig avhengighet mellom prøver i interpolasjonsområdet (Burrough og McDonnell, 2009).

Parametrene range, sill og nugget er sentrale begreper innen kriging og kan uttrykkes grafisk i semivariogram. Generelt så har semivariogrammer uten fjerning av trend lavere nugget-verdi og dermed lave feilverdier. Range-verdier uten fjerning av trend er generelt høyere enn range-verdier med fjerning av 1.ordens trend, og tar dermed med punkter med større gjensidig punktavstand. Sill-verdier er også høyest for kriging uten fjerning av trend. Sill er der grafen i et semivariogram flater ut slik at korrelasjonen mellom gjensidig punktavstand og observasjonsverdier blir lav. Verdier høyere enn sill-verdien er derfor mindre nyttig å ta med i en interpolasjon.

4 Data

4.1 Målinger og beregninger av overflatemassebalanse

Storbreen's observasjonsserie av massebalansemålinger strekker seg tilbake til 1949, og er dermed den lengste serien i Norge og nest lengste serien i verden. Det er bare Storglaciären i Nord-Sverige som har lengre serie i verden, tilbake til 1945/1946 (Holmlund, 1986). Omfanget av målingene ved Storbreen har variert mye siden da. De første 15 årene var det et omfattende måleprogram, med ca 30 staker jevnt fordelt utover breen, dybdesondering av snøen i ca. 600 punkter, og ofte tre eller flere snøgroper for beregning av tetthet (Liestøl, 1967).

Når det gjelder totalverdier for beregnet massebalanse (b_n , b_w og b_s) for hele Storbreen, samt ELA og kumulativ b_n , så er verdier tilbake til 1949 tilgjengelig i NVE sin årlige rapport for massebalansemålinger i Norge. Den nyeste, Kjøllmoen et al., (2011) inneholder data fram til 2010, som benyttets i denne analysen.

Når det gjelder data for beregnet massebalanse ved de forskjellige stakeposisjoner, så er situasjonen mer komplisert. For perioden 2000 t.o.m. 2010 har NVE, ved Liss M. Andreassen, forsynt digitale beregnede massebalansedata for stakene som har vært benyttet. For perioden 1994 t.o.m. 1999 har NVE forsynt arkiverte beregnede massebalansedata nedskrevet i papirskjemaer, som forfatteren har digitalisert. For perioden 1985 t.o.m. 1993 foreligger det nedskrevne registreringer og notater av målte stakehøyder og snøtetthet, med varierende grad av kompletthet, i NVE sine arkiver.

Som Tabell 6.2 viser, så er stakeposisjonene 1-8 målt de fleste av årene 1985-2010, selv om særlig stake 5, 7 og 8 ikke har blitt målt en del av årene. Figur 3.3 viser stakepunktene's beliggenhet. Noen få år har også stakeposisjoner med nummer 9, 10, 11 og 12 blitt målt, men disse er ikke sett på i analysen.

I 1988-1989 ble nummereringen på de ulike stakeposisjonene forandret, slik at dette har skapt noe forvirring i arbeidet med å gjennomgå dataene i arkivet. Ifølge akkumulasjonskart fra 1987 og 1988 er stake 2 i disse årene lokalisert omtrent midt mellom der stake 5 og stake 4 er posisjonert i nyere år (senere enn 1989). Denne staken er derfor utelatt fra analysen.

Noen år er det hull i massebalanseserien som følge av at sonderingsstengene som er brakt med ikke har vært tilstrekkelig lange i år med stor vinterakkumulasjon, som for eksempel i 1989, da det i stakeskjemaet er registrert en akkumulasjon på >500 cm ("mer enn" 500 cm) ved stake 6.

I 1987 er verdien 0,5 benyttet som snøtetthetsverdi i notatene for massebalanseberegninger i arkivet, antageligvis i mangel på beregnet snøtetthet.

For 1986 er det ikke registrert data for stakemålinger verken for akkumulasjon ved årets maksimum i april/mai eller ablasjonsmålinger ved årets minimum i september/oktober. Dette året finnes det kun stakemålinger fra 7. juni i arkivet.

1992 er det akkumulasjonsmålinger og dermed b_w for stakene 1-6. Men ut fra stakeskjemaet jeg har brukt som kilde, er det kun stake 3 og 4 som har entydige resultater for ablasjon, da stake 1 og 2 var utsmeltet mens det er oppgitt ablasjonsmålinger for flere ulike staker ved hver av stakeposisjonene 5 og 6, som alle er utelatt. Det er bare oppgitt én akkumulasjonsmåling for hver av stakene 5 og 6 fra sesongmaksimum i mai, og det er uvisst hvilke av disse akkumulasjonsmålingene som hører til de ulike ablasjonsmålingene.

b_s –verdien for stake 5 i 2003 er beregnet ut fra formel 1 (del 3.1) med utgangspunkt i b_n - og b_w -verdi fra to forskjellige staker ved denne stakeposisjonen, hhv. stake 5a(b_n) og stake 5c(b_w).

Det blir brukt litt forskjellige verdier for tettheten på den firnen eller isen som har smeltet gjennom balanseåret (utover dette årets nyakkumulerte snø). Noen år er tetthetsverdien $0,6 \text{ g/cm}^3$ brukt, andre år på 2000-tallet er $0,7 \text{ g/cm}^3$, $0,75 \text{ g/cm}^3$ (2006 og 2003) eller $0,8 \text{ g/cm}^3$ (2004) benyttet. Dette er fordi det tas hensyn til hvor mye firn som ligger igjen fra tidligere år, som vil påvirke tettheten (Andreassen, pers.medd.).

4.2 NAO-indeks

Verdier for månedlig NAO-indeks er hentet fra National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) og Climate Prediction Center (CPC) (2011). Det er benyttet data for perioden 1950-2010.

4.3 Kartlag og terrengmodeller

I analysen er det benyttet kartlag og terrengmodeller basert på kartlegging fra 2009, 1997, 1984, 1968, 1951 og 1940. Kartene fra 1997, 1984, 1968, 1951 og 1940 har skala 1:10000 med 10 m konturintervall (Andreassen, 1999). Analog fotogrammetri og vertikale flyfoto er benyttet for å lage kartene fra 1968 og 1984, mens 1997-kartet er basert på digital fotogrammetri og vertikale flyfoto. Fotografier fra 1997 ble skannet og benyttet til å konstruere en digital terrengmodell (DTM). Kartene fra 1951 og 1940 er basert på analog fotogrammetri og fotografering fra land. 1940-kartet er mangelfullt i noen høytliggende deler av breen (Andreassen, 1999). For 2009 er det en DTM basert på laserskanning og flyfotografering fra høsten 2009 (Kjøllmoen et al., 2010).

4.4 Snødybdemålinger

Digitale akkumulasjonskart fra NVE for 40 år mellom 1951 og 2010 har vært tilgjengelig i analysen. Det inkluderer en kontinuerlig serie med akkumulasjonskart for alle de 17 årene fra 1994 til 2010. Før dette er det mer mangelfullt, med 23 kart fra 1951 til 1993, som innebefatter årene 1951, 1953-1957, 1960, 1962-1965, 1968-1971, 1973-1978, 1983 og 1984. Kun et fåtall av akkumulasjonskartene har oppgitt korrigerte snødybdeverdier i vannekvivalenter, og for mange av årene er det ikke oppgitt snøtetthet. I analysen er det kun brukt ukorrigerede snødybdeverdier

Det ble gjort flest sonderinger per sesong i de tidligste årene i dataserien, 1951-1956, med et høydepunkt på 467 målinger i 1956 (se tabell 6.4 og figur 6.11). Deretter sank antallet sonderinger til et relativt lavt antall i perioden fra slutten av 1960-tallet til slutten av 1990-tallet. Antallet har deretter steget til et relativt høyt nivå, rundt ca. 150 sonderinger per sesong fra 1999 til 2009. I 2010 var antallet sonderinger 322, og dermed det 3. høyeste bak 1956 og 1951.

Målepunktenes fordeling utover breen varierer mye. I de siste og første årene, hhv. 1996-2010, og 1951-1956, samt 1960, 1962 og 1964, er sonderingene generelt ganske jevnt fordelt utover store deler av breens areal. Med det følger at interpolasjon over større arealer kan gjennomføres med mindre grad av usikkerhet enn i de år da målepunktene bare dekker mindre deler av breen.

I de fleste av årene på 1970-tallet, 1980-tallet og noen av årene på 1960-tallet, er sonderingene gjort med generelt tette mellomrom mellom målepunktene over relativt små deler av breens areal i akkumulasjonsområdet og ablasjonsområdet. Slik er det i 1963, 1968, 1970, 1971, 1973, 1975, 1976, 1977, 1983 og 1984. Målingene i akkumulasjonskartene for disse årene vil være dårlig egnet for interpolasjon over hele breen. Avstanden mellom målepunktene er generelt omtrent 50 m i 1970, 1971, 1976, 1977 og 1984, og omtrent 100 m i 1963, 1968, 1975 og 1983.

Østrem og Listøl (1964) skriver at det ikke lenger var nødvendig å foreta sonderinger fullt så tett som tidligere ettersom vinternedbørens normale fordeling var ganske godt kjent fra akkumulasjonsmålingene fram til det. Selv om det tidligere var benyttet opp til 600 sonderinger, hadde det vist seg at langt færre punkter var tilstrekkelig for å gjøre en god akkumulasjonsmåling i et godt år. Ifølge Liestøl (1970) begrenset man seg i noen av de siste årene før 1970 til å utføre snøsonderinger i to representative områder, ved ca. 1630 m.o.h. og 1850 m.o.h. Med utgangspunkt i tidligere års mer omfattende og eksakte målinger, ble de to representative områdene funnet å ha svært god korrelasjon med den totale akkumulasjonen for hele breen.

4.5 Vinndata og temperaturdata fra AWS Storbreen

Det er benyttet vinndata og temperaturdata fra en AWS (fig.) utplassert i nedre del av Storbreen ca 1570 m.o.h., ca. 900 m fra brefronten (se geografisk plassering i figur 3.3). Stasjonen drives av IMAU, som har et nettverk av AWS på et antall breer i Antarktis, Grønland, Alpene og Norden, inkludert tre breer på Fastlands-Norge. Disse tre breene er Storbreen (fra 2001), Midtdalsbreen (fra 2000) og Langfjorøkelen (2007-2010) (IMAU, 2011). Ved stasjonen på Storbreen er det et nord-østlig overflateaspekt, og en overflatehelning på ca. 6° (Giesen et al., 2009). Stasjonen hadde i perioden 2001-2006 to nivåer med forskjellige sensorer, i 5,7 og 2,4 m høyde over isoverflaten, som begge har målt vindhastighet og vindretning, samt lufttemperatur og relativ luftfuktighet (Andreassen et al., 2008b; Giesen et al., 2009). F.o.m. 2006 ble instrumentene på den nederste delen fjernet (Andreassen, pers.medd.). Sensorene har forskjellig målenøyaktighet, og målenøyaktigheten for instrumentene på Storbreens AWS er 0,3 m/s for vindhastighet og 3° for vindretning, mens målenøyaktigheten for lufttemperatur er 0,3°C (IMAU, 2011). Det måles også lufttrykk og overflatehøyde, og det øverste instrumentet (5,7 m høyde) måler innkommende og utgående kortbølge- og langbølgestråling.

Måleverdiene for vindhastighet, vindretning og lufttemperatur blir loggført på stasjonen som snittverdier à 30 minutter, dvs. 48 verdier per døgn og 10176 verdier per akkumulasjonssesong (1. oktober – 30. april). Når det gjelder temperaturdataene, så har de 48 verdiene per døgn blitt sammenfattet til en middelvei per døgn av NVE-personell.

Storbreens AWS har vært i nær sagt kontinuerlig drift fra september 2001 og fram til i dag, men det er to perioder som mangler data. Det gjelder 30. juli – 17. august 2004, da stasjonen var falt ned, og en periode fra 21. august 2009 – 15. juli 2010, da det ikke ble lagret data pga minnekortfeil.

Hullet i dataserien sommeren 2004 påvirker ikke denne analysen, ettersom verdiene for lufttemperatur, vindhastighet og vindretning her har blitt sett på i diagrammer kun for hver enkelt akkumulasjonssesong (1. oktober – 30. april) fra 2001 til 2010.



Figur 4.1: AWS i ablasjonsområdet på Storbreen, august 2010 (Foto: Tor Øksendal).

4.6 Vinddata fra Sognefjellhytta

I analysen er det brukt døgnerverdier for gjennomsnittlig vindhastighet (m/s) og vindretning (0-360°) fra den meteorologiske stasjonen Sognefjellhytta. Data er lastet ned fra Meteorologisk Institutt's klimadatabase ved deres elektroniske tjeneste eklima (www.eklima.no).

Sognefjellhytta er den av Meteorologisk Institutt's værstasjoner som ligger nærmest Storbreen. Denne befinner seg ca. 8 km vest for Storbreen, 1413 m.o.h. Stasjonen ble drevet manuelt fra 1979 til 1989, og har blitt drevet som en automatisk stasjon fra 1997 og utover (Andreassen og Oerlemans, 2009). Perioden i mellom (1989-1997) mangler data.

Det er benyttet data for alle akkumulasjonssesonger (1. oktober – 30. april) i perioden 2001-2010, unntatt akkumulasjonssesongen 2001/2002, som mangler data. For hvert døgn er det én verdi for gjennomsnittlig vindhastighet og tre ulike verdier for vindretning, dvs. én verdi målt kl. 06.00, én verdi målt kl. 12.00 og én verdi målt kl. 18.00.

En del døgn, særlig i vintermånedene, mangler verdier enten for vindhastighet eller vindretning. Noen perioder har spesielt store mangler, bl.a. desember 2004 og januar 2005, som til sammen mangler 24 av 61 døgnerverdier for vindhastighet. Periodene fra 16. desember 2003 til 23. januar 2004, og 29. november 2006 til 16. januar 2007, er det ingen verdier for vindretning.

4.7 Nedbørsdata fra Bøverdalen

I analysen er det brukt døgnerverdier for nedbør (mm) fra den meteorologiske stasjonen Bøverdalen (701 m.o.h.), som ligger ca. 1,5 mil nordøst for Storbreen og har vært i drift siden 1905 (Andreassen og Oerlemans, 2009). Dette er den av Meteorologisk Institutt's stasjoner med nedbørsmålinger som ligger nærmest

Storbreen. Andreassen og Oerlemans (2009) beregnet korrelasjonen r mellom b_w på Storbreen og akkumulert vinternedbør (definert som nedbør fra 15. september til 14. mai) til 0,70 for perioden 1949-2006.

Data fra perioden 2001-2009 har blitt lastet fra eklima (www.eklima.no). Nedbøren blir målt med vanlige nedbørsmålere. Det er usikkerhet knyttet til hvor stor andel av snøen som fanges opp i nedbørsmålerne. Verdier for snø gjøres om til mm vannekvivalenter. Kun nedbørsverdier fra 1. oktober til 30. april har blitt sett på i analysen. Mange av disse døgnene mangler nedbørsverdier. I 2001/2002 mangler 99 av totalt 212 døgn verdier. Andelen manglende døgn de andre sesongene i perioden er: 130 av 212 for 2002/ 2003, 121 av 213 for 2003/ 2004, 121 av 212 for 2004/2005, 137 av 212 for 2005/2006, 96 av 212 for 2006/2007, 114 av 213 for 2007/2008 og 126 av 212 for 2008/2009.

5 Metoder og databehandling

5.1 Sammenligning av stakemassebalanse, totalmassebalanse og NAO-indeks

For noen av årene i perioden 1985-1993 har forfatteren beregnet massebalanse for enkelte av de forskjellige stakene som har blitt målt, basert på nedskrevne registreringer og notater (med varierende grad av kompletthet) av stakehøydeverdier og snøtetthet fra NVE sine arkiver. Disse massebalanseberegningene har blitt gjort med utgangspunkt i formel 1 (del 3.1) og beregningsmetoden utredet i del 3.3. Dette er gjort for 1985 (stake 7 og 8), 1988 (stake 6), 1989 (stake 1, 2, 3, 4 og 8), 1990 (stake 1, 2, 3, 4 og 6), 1991 (stake 4 og 6), 1992 (stake 4) og 1993 (stake 5 og 6).

For de stakeposisjonene som har to eller flere b_n -, b_w - eller b_s -stakeverdier basert på to eller flere staker, er det beregnet og benyttet et gjennomsnitt av de ulike stakeverdiene, istedenfor å velge ut og benytte verdiene for en bestemt stake. Dette er gjort for 1990 (stake 3), 1996 (stake 5), 1997 (stake 5), 1998 (stake 5 og 6), 1999 (stake 5 og 6), 2001 (stake 5), 2002 (stake 3, 5 og 6), 2003 (stake 3), 2005 (stake 6 og 8).

b_s -verdien for stake 5 i 2003 er beregnet ut fra formel 1 (del 3.1) med utgangspunkt i b_n - og b_w -verdi fra to forskjellige staker ved denne stakeposisjonen, hhv. stake 5a(b_n) og stake 5c(b_w).

For stake 1 i 2007 er ikke b_s oppgitt i stakeberegningene fra NVE, men b_s beregnes etter formel 1 (del 3.1) basert på oppgitte stakeverdier for b_w og b_n .

Det er beregnet korrelasjonskoeffisienter r og r^2 mellom b_n -, b_w - og b_s -stakeverdier og hhv. b_n -, b_w - og b_s -totalverdier og NAO-indeks (1.okt.-30.apr.) for hver av stakeseriene fra 1985 til 2010. Graden av samvariasjon er illustrert i

linjediagrammer. Det er også beregnet gjennomsnitt og standardavvik for b_n -, b_w - og b_s -stakeserier og totalserier.

Det at forskjellige stakeposisjoner er utelatt fra serien i forskjellige år, kan innebære en skjevhet med hensyn på å sammenligne korrelasjonen mellom totalverdiene av b_n , b_w og b_s for hele Storbreen med verdiene for de ulike stakeposisjonene. Den romlige variasjonen i b_n , b_w og b_s varierer fra år til år, influert av bl.a. meteorologiske faktorer som vind, nedbørsfordeling og variasjon i temperatur og strålingsbalanse, slik at skjevheten vil variere ut fra hvilke år som er utelatt. For å gjøre verdiene mer sammenlignbare i en sammenligning av flere stakeposisjoners massebalanseserier, har seriene blitt homogenisert ved å bare inkludere år med komplett dekning av staker, dvs. utelatte år da en eller flere stakeposisjoner er utelatt. Kun perioden 1995-2010 er tatt med i denne sammenstillingen, unntatt 1996, 1997, 2007 og 2009, som mangler verdier for noen stakeposisjoner. Stakeposisjonene med de minst komplette måleserier (stake 5, 7 og 8) er også tatt bort, slik at sammenstillingen bare gjelder for stake 1, 2, 3, 4 og 6. Det er beregnet korrelasjonskoeffisienter r og r^2 mellom b_n -, b_w - og b_s -stakeverdier og hhv. b_n -, b_w - og b_s -totalverdier og NAO-indeks (1.okt.-30.apr.) for hver av disse stakeseriene for de tolv årene mellom fra 1995 og 2010. Graden av samvariasjon mellom de ulike stakeposisjonene har blitt illustrert i linjediagrammer, og det er også beregnet gjennomsnittlige b_n -, b_w - og b_s -stakeverdier og b_n -, b_w - og b_s -totalverdier for disse tolvårige seriene.

Det har også blitt beregnet korrelasjon r og r^2 mellom b_w -totalverdier og NAO-indeks (1.okt-30.apr) for perioden 1951-2010. Graden av samvariasjon er illustrert i ett linjediagram og spredningsplott.

5.2 Vinddata, temperaturdata og nedbørsdata

Vindhastighet og vindretning fra Storbreens AWS har blitt plottet i åtte punktdiagrammer, ett for hver av de åtte akkumulasjonssesongene (1. okt. – 30.

apr.) fra 2001 til 2009, med til sammen 10176 punkter (verdier for hvert 30. min.) i hvert diagram.

Døgnmiddeltemperaturer fra Storbreens AWS og nedbørsdata fra Bøverdalen værstasjon har blitt plottet i åtte linjediagrammer, ett for hver av de åtte akkumulasjonssesongene (1. okt. – 30. apr.) fra 2001 til 2009. Mange døgn mangler nedbørsverdier, og disse døgnene står tomme i nedbørsgrafene.

Antall døgn med positive døgnmiddeltemperaturer ($> 0^{\circ}\text{C}$) 1. okt – 30. apr. har blitt talt opp for hver av de åtte akkumulasjonssesongene med AWS-data, og disse døgnenes positive temperaturverdi har blitt summert for hver sesong. Nedbørsmengde for alle døgn med positive middeltemperaturer har også blitt summert for hver av de åtte akkumulasjonssesongene.

Vindhastighet og vindretning fra Sognefjellhytta har blitt satt opp i punktdiagrammer for hver enkelt akkumulasjonssesong 2001-2010, hvor alle de tre måleverdiene for vindretning fra hvert døgn, fra kl. 06.00, kl. 12.00 og kl. 18.00, har blitt tilordnet samme gjennomsnittlige verdi for vindhastighet. Det faktum at vindhastigheten kan ha forskjellige verdier kl. 06.00, kl. 12.00 og kl. 18.00 er en klar feilkilde. Kun døgn som både har verdier for vindhastighet og vindretning er plottet som punkter i diagrammene. En del døgn, særlig i vintermånedene, mangler verdier enten for vindhastighet eller vindretning

5.3 Relativ snødybde og snøfordelingskart

Ut fra hver enkelt snødybdeverdi for alle sonderingspunktene de ulike årene er det beregnet *relativ snødybde*, her definert som snødybde i et enkelt sonderingspunkt dividert på gjennomsnittlig snødybde fra alle sonderingspunkter dette året.

Snødybdeverdiene som her danner basis er ikke korrigert for snøtetthet. Den relative snødybden har blitt klassifisert i 11 verdiintervaller mellom 0 og 3,1, hvor de 10 laveste intervallene er på 0,2 (0-0,2, 0,2-0,4 etc.) mens det høyeste intervallet er

2,0-3,1. Svært få sonderinger kommer innenfor det høyeste intervallet. Denne klassifiseringen benyttes i alle snøfordelingskartene.

De relative snødybdeverdiene fordeling utover breen de forskjellige akkumulasjonssesongene, demonstrerer variasjonen i snøfordeling med en klassifisering som har felles gyldighet for alle årene med akkumulasjonskart.

Sonderingspunktene relative snødybdeverdi er interpolert utover breens areal ved metoden kriging (se teori om kriging i del 3.5) i år med relativt jevn og representativ fordeling av punkter utover breen. Usikkerheten for de interpolerte verdiene i rasteret øker med avstanden fra punktene med måleverdier. Derfor er det tilstrebet å bruke sonderingskart med mange målepunkter og god fordeling av målepunkter utover mest mulig av breens areal. Spatial Analyst-verktøyet i programmet ArcGIS Desktop 9.3.1 (utgitt 2009) er benyttet til å gjennomføre interpolasjonene, tilpasse interpolasjonene til breens kartgrenser og legge de digitaliserte sonderingspunktene over interpolasjonskartene. Interpolasjonskartenes grenselinjer er basert på: kartet over Storbreen fra 2009 for årene 2010 og 2009, kartet fra 1997 for årene 1997-2008 og kartet fra 1984 for året 1996.

Det er også beregnet verdier for intervallet (maksimumverdi minus minimumverdi) for relativ snødybde kalkulert ut fra alle sonderingspunktene verdi i hvert enkeltår med akkumulasjonskart. Dette kan si noe om størrelsen på snødybdevariasjonen og være interessant i forhold til å se på om størrelsen på dette årlige intervallet samvarierer med hhv. gjennomsnittlig årlig snødybde eller antallet årlige sonderinger. Det er også beregnet gjennomsnittsverdi for alle 40 årene for disse tre variablene, samt korrelasjonskoeffisient r for (1) sammenhengen mellom antall årlige sonderinger og intervallet for relativ snødybde, og (2) sammenhengen mellom antall årlige sonderinger og intervallet for relativ snødybde.

Intervallet for relativ snødybde er beregnet på bakgrunn av ekstremverdier, og kan være lite representativt for variasjonen i hele tallmaterialet. For å få et mer helhetlig bilde av variasjonen i snødybde i årene fra 1996 til 2010, er det beregnet differanse

mellom 90-prosentil og 10-prosentil, samt differanse mellom 3.kvartil og 1.kvartil. For hvert år fra 1996 til 2010 er det også beregnet standardavvik for alle verdiene for relativ snødybde. Det er beregnet korrelasjon mellom disse indikatorene og gjennomsnittlig snødybde, og indikatorene er plottet i stolpediagram sammen med intervall for relativ snødybde.

5.4 Helning, aspekt og "hillshade"

Fra terrengmodellene er det avledet helningskart, aspektkart og "hillshade"-kart. Spatial Analyst-verktøyet i programmet ArcGIS Desktop 9.3.1 (utgitt 2009) er benyttet til å generere disse kartene. Det er brukt en cellestørrelse på 5 * 5m. Sonderingspunkters klassifiserte relative snødybde har blitt overlatt terrengmodeller, aspekt- og helningskart ved hjelp av programvaren.

I helningskart beregnes helning i terrengmodellen som $(\text{høydeøkning})/(\text{lengdeøkning})$, dvs. tangens. Helningen kan uttrykkes som en verdi mellom 0 grader, der terrenget er flatt, og 90 grader, som innebærer loddrett helning. Helningen for en rastercelle i et rasternetttverk er den bratteste helningen til et plan definert av cellen og dens åtte naboceller (Burrough og McDonnell, 2009, s.190).

Aspekt er et uttrykk for hvilken retning terrenget heller i maksimal grad (innenfor hver piksel), noe som kan være vanskelig å se visuelt av en høydemodell med rasterstruktur, lettere av en TIN-modell.

"Hillshade"-kart kan gjøre det lettere å visualisere aspekt i en høydemodell med raster-struktur. Programmet simulerer da belysning fra en bestemt synsvinkel, slik at f. eks. fjellsider som skråner mot lyskilden blir lysere mens skyggesiden blir mørkere. En slik transformasjon av raster-høydemodellen av Storbreen fra 2009 er gjort i analysen, med simulert belysning fra nordvest. Stripper og feil forekommer i

"hillshade"-kart, men det ble ikke notert tydelige feil i "hillshade"-kartet generert for analysen.

5.5 Massebalanseberegning for forskjellige utvalg av sonderingspunkter

Akkumulasjonen på Storbreen ble for 2010 beregnet ut fra sonderingenes gjennomsnittsverdi i hvert 50 m høydeintervall (Kjøllmoen et al., 2011). Forfatteren var med å gjøre sonderinger dette året sammen med Rune Engeset og Liss Andreassen fra NVE, og det ble til sammen gjort 322 sonderinger (se tabell 6.4 og figur 6.11), som er ca. dobbelt så mange som årene før. Det har blitt undersøkt i hvilken grad det å trekke bort et antall sonderinger fra 50 m høydeintervallene virker inn på resultatet av massebalanseberegningen. Utrekningen av massebalansen for hele breen er beskrevet i del 3.3.

Det ble gjort tilfeldige utvalg av 50% og 25% av sonderingene innenfor hvert 50 m høydeintervall. Fire slike tilfeldige utvalg ble gjort for 50% av sonderingene i hvert intervall. Det ble trukket ut ytterligere fire utvalg bestående av 25% av sonderingene i hvert intervall, og hvert av disse utvalgene 1-4 ble trukket ut av utvalgene 1-4 på 50% av sonderingene. Ettersom 50% og 25% av antallet sonderinger innenfor et intervall ikke alltid er et heltall, så har det har blitt avrundet til nærmeste heltall.

Det har også blitt gjort to utvalg basert på helningskartet generert fra terrengmodellen fra 2009 (figur 6.8). Det ene utvalget innebefatter sonderinger i terreng med mer enn 10° helning, mens det andre gjelder terreng med opptil 10° helning. For det sistnevnte utvalget er det ingen sonderinger i høydeintervallene 1400-1450 m.o.h., 1950-2000 m.o.h. og 2000-2050 m.o.h. Disse høydeintervallene omfatter relativt små deler av breens areal (tabell 6.7), men i vinterbalanseberegningene for dette utvalget er det brukt middelveier for alle sonderingene i disse intervallene. Det totale antallet sonderinger og antallet sonderinger i hvert høydeintervall for de ulike utvalgene er vist i tabell 5.1.

For hvert av disse utvalgene har det blitt utført beregninger av vinterbalanse for hele breen etter metoden beskrevet i del 3.4. Den spesifikke vinterbalansen for hvert 50 m. høydeintervall beregnes som gjennomsnittet av alle tilhørende sonderingsverdier (i m.v.e.), og den totale spesifikke vinterbalansen kalkuleres som summen av alle intervallverdiene. Den spesifikke vinterbalansen for hvert 50 m. høydeintervall har blitt plottet etter høydeintervall i punktdiagrammer med utjevnete linjer og indikatorer for hvert utvalg. For de tilfeldige utvalgene er det beregnet gjennomsnittlig avvik (ut fra avvikenens absoluttverdi) fra hele breens totale spesifikke b_w .

Intervall +/- 25m	Alle sond.	Tilfeldig utvalg 1-4		Utvalg, helning	
		Tilf. utvalg 50%	Tilf. utvalg 25%	>10° heln.	<=10° heln.
2025	2	1	1	2	0
1975	10	5	3	10	0
1925	19	10	5	14	5
1875	27	14	7	8	19
1825	38	19	10	5	33
1775	39	20	10	12	27
1725	37	19	9	8	29
1675	20	10	5	17	3
1625	33	17	8	10	23
1575	47	24	12	4	43
1525	30	15	8	4	26
1475	17	9	4	7	10
1425	3	2	1	3	0
sum	322	165	83	104	218

Tabell 5.1: Det totale antallet sonderinger og antallet sonderinger i hvert høydeintervall for de tilfeldige utvalgene 1-4 (50% og 25% av alle sonderingene), utvalget med mer enn 10° helning, utvalget med opptil 10° helning og alle sonderingene.

Det er benyttet spesifikke verdier i m.v.e. for sonderingene. For 2010 har NVE-personell benyttet verdier for snøtetthet på 380 kg/m³ på høydenivåer opp til 1650 m.o.h. og 360 kg/m³ for høyder over dette, så disse verdiene er brukt i utregningene her også.

Volumvinterbalansen er beregnet for alle utvalgene ved å multiplisere breens areal i hvert høydeintervall med den beregnede spesifikke vinterbalansen i hvert høydeintervall. I kalkuleringen er det brukt arealverdier i km² med to desimalers

nøyaktighet, som oppgitt i Kjølmoen et al. (2011). Volumvinterbalansen for hvert 50 m. høydeintervall har blitt plottet etter høydeintervall i punktdiagrammer med utjevnete linjer og indikatorer for hvert utvalg. Den totale volumvinterbalansen for hele breen finnes som summen av alle intervallverdiene i hvert utvalg.

I massebalansediagrammene får hvert høydeintervall fire middelverdier basert på tilfeldige utvalg (1-4) Det er beregnet standardavvik for hver slik samling av fire verdier i hvert høydeintervall. Dette er gjort både for volumberegningen og beregningen av b_w og standardavvikene er plottet i diagram.

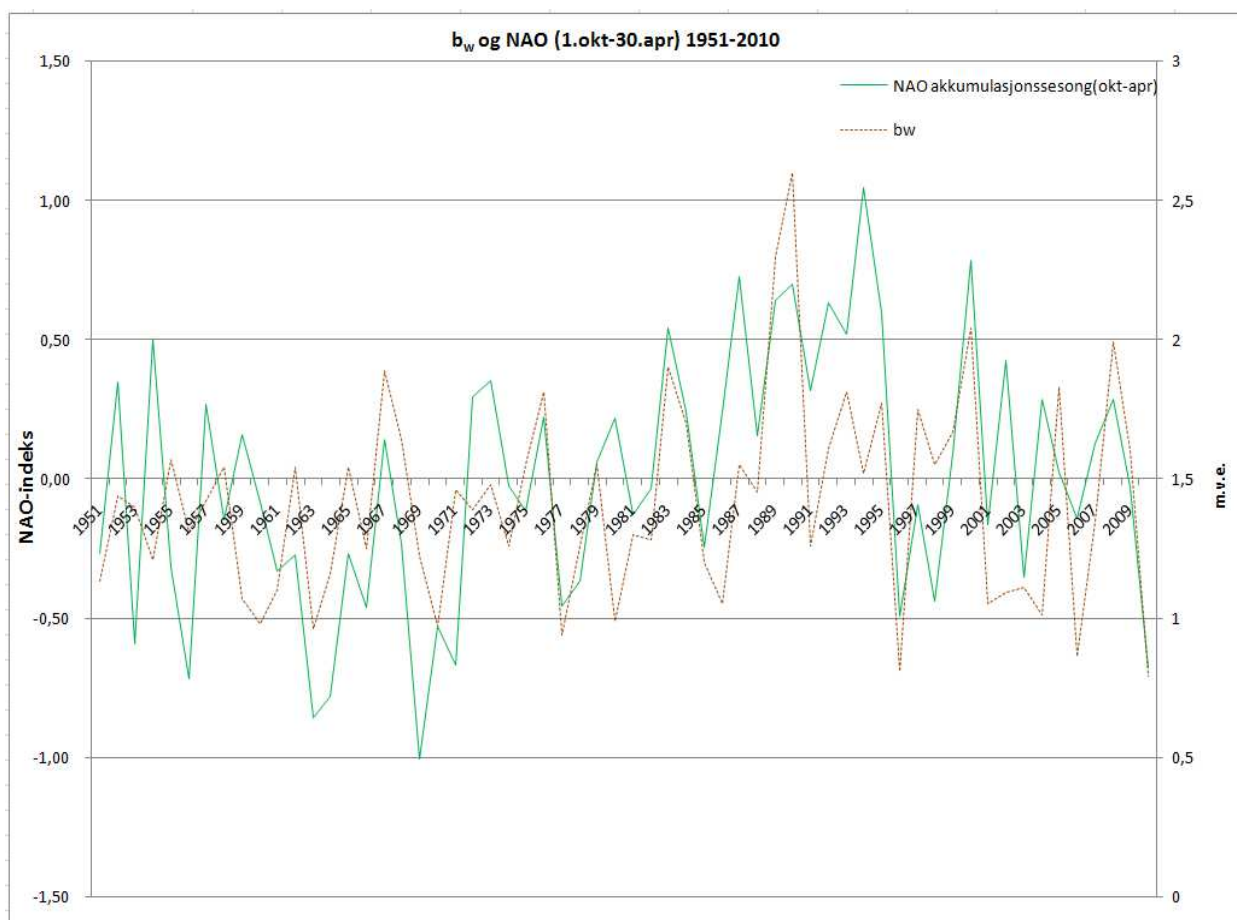
Det er også beregnet og plottet standardavvik for alle sonderingsverdiene (i m.v.e.) i hvert høydeintervall i de 10 ulike utvalgene, samt for alle de 322 sonderingsverdiene i 2010, i tillegg til standardavvik fra 1400 til 2050 m.o.h. for disse.

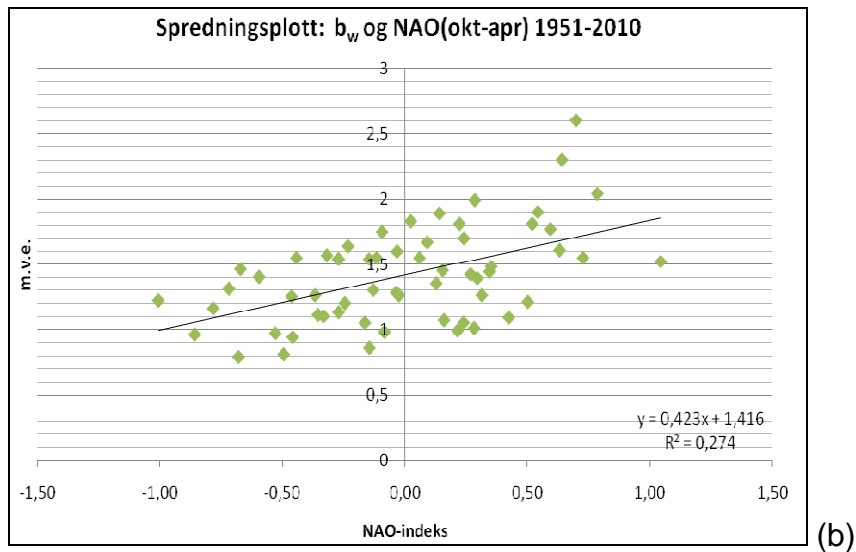
6 Resultater og observasjoner

6.1 Sammenligning av stakemassebalanse, totalmassebalanse og NAO-indeks

Linjediagrammet og spredningsplottet i figur 6.1 illustrerer graden av samvariasjon mellom b_w -totalverdier for Storbreen og NAO-indeks (1.okt-30.apr) for perioden 1951-2010. Korrelasjonen r og r^2 mellom variablene er på hhv. 0,52 og 0,27, som innebærer en ganske sterk korrelasjon

(a)





Figur 6.1: (a) b_w -totalverdier (m.v.e.) og NAO-indeks (1.okt-30.apr) for perioden 1951-2010. (b) Spredningsplott med lineær regresjon for b_w og NAO (okt.-apr.) for årene 1951-2010. Den lineære regresjonsligningen og r^2 er vist nede til høyre på figuren.

Tabellene 6.1 og 6.2 lister opp beregnede b_n -, b_w - og b_s -stakeverdier i m.v.e. for hhv. stakeposisjonene 1-4 og 5-8 for perioden 1985-2010. For denne perioden viser tabellene også b_n -, b_w - og b_s -totalverdier beregnet for hele breen, snittverdier og standardavvik for b_n -, b_w - og b_s -seriene, NAO-indeks (1.okt.-30.apr.) og korrelasjonskoeffisienter r og r^2 mellom b_n -, b_w - og b_s -stakeverdier og hhv. b_n -, b_w - og b_s -totalverdier og NAO-indeks. Som tabellene viser, så er stakeposisjonene 1-8 målt de fleste av årene 1985-2010, selv om særlig stake 5, 7 og 8 ikke har blitt målt en del av årene. Noen få år har også stakeposisjoner med nummer 9, 10, 11 og 12 blitt målt, men disse er ikke disse sett på i analysen. Tabell 6.3 viser de samme variablene, men kun for perioden 1995-2010 (unntatt 1996, 1997, 2007 og 2009), og kun stakeverdier for stake 1, 2, 3, 4 og 6. Figur 6.2, 6.3 og 6.4 viser plott av b_w - og b_n -stakeverdier med b_w - og b_n -totalverdier og NAO-indeks for seriene i tabell 6.1 og 6.2.

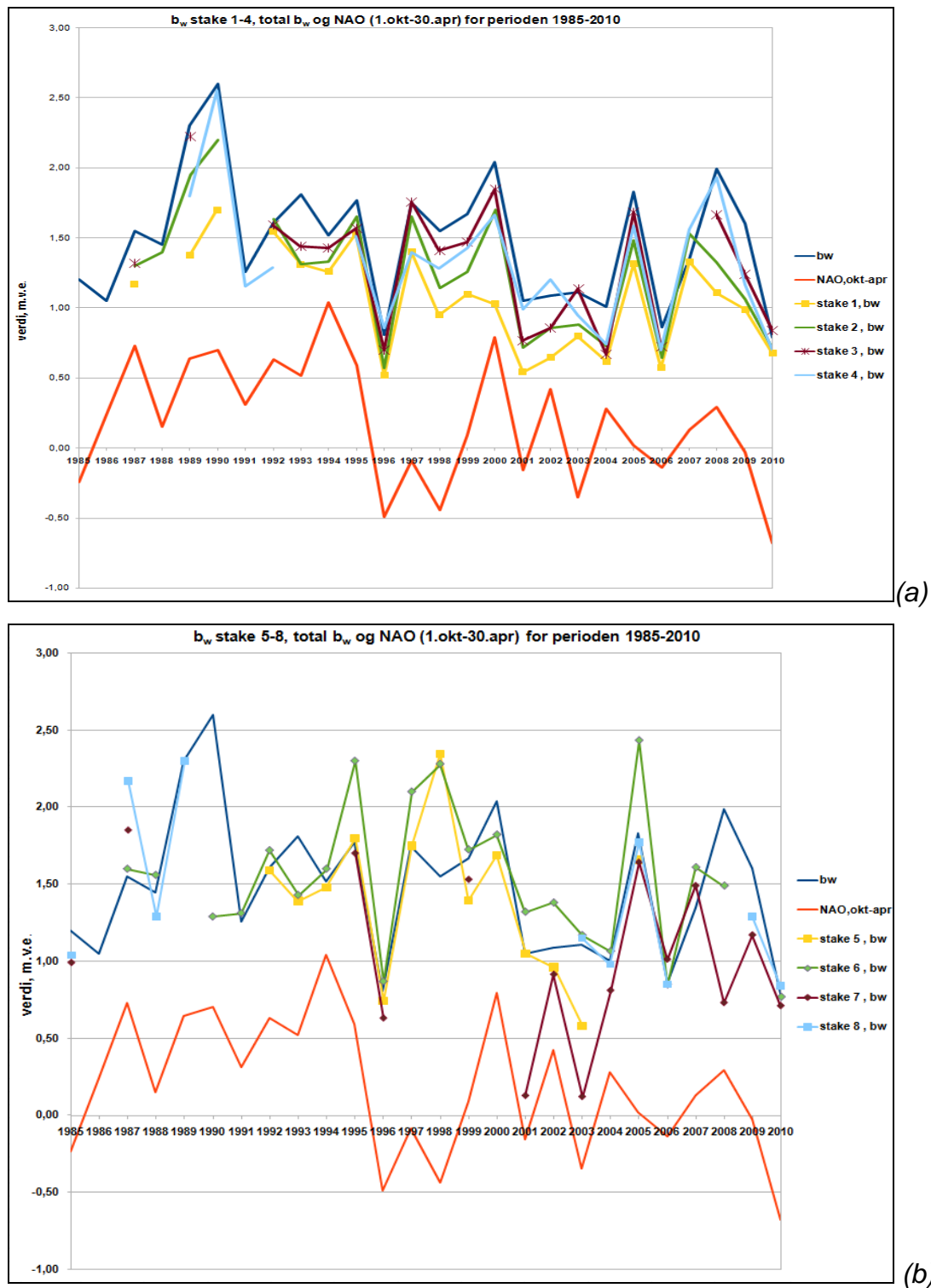
	Stake 1			Stake 2			Stake 3			Stake 4			Totalverdi			NAO
År	b _n	b _w	b _s	b _n	b _w	b _s	b _n	b _w	b _s	b _n	b _w	b _s	b _n	b _w	b _s	
1985													-0,40	1,20	-1,60	-0,24
1986													-0,32	1,05	-1,37	0,24
1987	-0,42	1,17	-1,59	-0,14	1,30	-1,44	-0,19	1,32	-1,51				0,32	1,55	-1,23	0,73
1988				-1,20	1,40	-2,60							-0,95	1,45	-2,40	0,15
1989	-1,35	1,38	-2,13	0,24	1,95	-1,71	0,63	2,23	-1,60	0,25	1,80	-1,55	1,20	2,30	-1,10	0,64
1990	-0,09	1,70	-1,79	0,51	2,20	-1,69	0,22			1,16	2,55	-1,39	1,25	2,60	-1,35	0,7
1991										-1,35	1,16	-2,51	-0,15	1,26	-1,41	0,31
1992		1,55			1,63		-0,36	1,59	-1,95	-0,34	1,29	-1,63	0,08	1,61	-1,53	0,63
1993	-1,13	1,31	-2,44	-1,03	1,31	-2,34	-0,16	1,44	-1,60				0,75	1,81	-1,06	0,52
1994	-1,48	1,26	-2,74	-0,89	1,33	-2,22	-0,16	1,43	-1,60				-0,25	1,52	-1,77	1,04
1995	-1,07	1,53	-2,60	-0,59	1,65	-2,18	-0,63	1,57	-2,20	-0,76	1,51	-2,27	-0,16	1,77	-1,93	0,59
1996	-2,27	0,52	-2,79	-1,94	0,57	-2,88		0,70		-1,24	0,86	-1,98	-1,03	0,81	-1,84	-0,49
1997	-2,12	1,40	-3,52	-1,65	1,65	-3,59		1,76		-1,98	1,40	-3,38	-1,03	1,75	-2,78	-0,09
1998	-1,76	0,95	-2,71	-1,37	1,14	-2,51	-0,19	1,41	-1,60	0,26	1,28	-1,02	0,22	1,55	-1,33	-0,44
1999	-1,95	1,10	-3,05	-1,53	1,26	-2,79	-0,78	1,47	-2,25	-0,59	1,43	-2,02	-0,24	1,67	-1,91	0,09
2000	-2,20	1,03	-3,23	-0,38	1,70	-2,16	0,00	1,85	-1,85	0,17	1,67	-1,50	0,55	2,04	-1,49	0,79
2001	-1,29	0,55	-1,83	-1,94	0,72	-2,65	-0,56	0,76	-1,32	-0,95	0,99	-1,94	-0,27	1,05	-1,32	-0,16
2002	-3,17	0,65	-4,06	-3,03	0,85	-4,11	-2,45	0,86	-3,63	-2,18	1,21	-3,35	-1,78	1,09	-2,87	0,42
2003	-2,90	0,80	-3,68	-2,76	0,88	-3,52	-2,09	1,14	-3,11	-1,91	0,95	-2,89	-1,57	1,11	-2,68	-0,35
2004	-2,07	0,62	-2,69	-1,85	0,73	-2,57	-1,93	0,67	-2,18	-0,88	0,74	-1,63	-0,58	1,01	-1,59	0,28
2005	-2,09	1,32	-3,40	-1,38	1,48	-2,86	-0,47	1,68	-2,15	-0,51	1,59	-2,10	-0,06	1,83	-1,89	0,02
2006	-3,05	0,58	-3,63	-2,83	0,64	-3,47	-2,33	0,72	-3,06	-2,44	0,70	-3,14	-2,15	0,86	-3,01	-0,14
2007	-1,73	1,33	-3,06	-1,35	1,53	-2,23				-0,89	1,56	-1,98	-0,39	1,35	-1,74	0,13
2008	-1,77	1,11	-2,88	-1,24	1,32	-2,57	-0,68	1,67	-2,35	-0,43	1,93	-2,37	0,11	1,99	-1,88	0,29
2009	-2,32	0,99	-3,31	-2,30	1,06	-3,36	-1,56	1,24	-2,80	-1,36	1,17	-2,53	-0,22	1,60	-1,83	-0,03
2010	-3,13	0,68	-3,80	-2,75	0,71	-3,46	-2,45	0,84	-3,29	-1,89	0,70	-2,59	-1,76	0,79	-2,55	-0,68
r stake/tot b	0,82	0,82	0,84	0,88	0,92	0,83	0,93	0,96	0,92	0,93	0,93	0,88				
r ² stake/tot b	0,68	0,68	0,70	0,78	0,84	0,68	0,87	0,92	0,84	0,87	0,87	0,77				
r b/NAO	0,58	0,60		0,70	0,64		0,59	0,50		0,52	0,64		0,59	0,59		
r ² b/NAO	0,34	0,36		0,49	0,40		0,35	0,25		0,27	0,41		0,34	0,35		
Gj.snitt	-1,87	1,07	-2,90	-1,43	1,26	-2,68	-0,85	1,32	-2,22	-0,89	1,32	-2,19	-0,34	1,49	-1,83	
St.avvik	0,83	0,36	0,68	0,98	0,44	0,69	0,97	0,44	0,69	0,93	0,46	0,66	0,86	0,46		

(a)

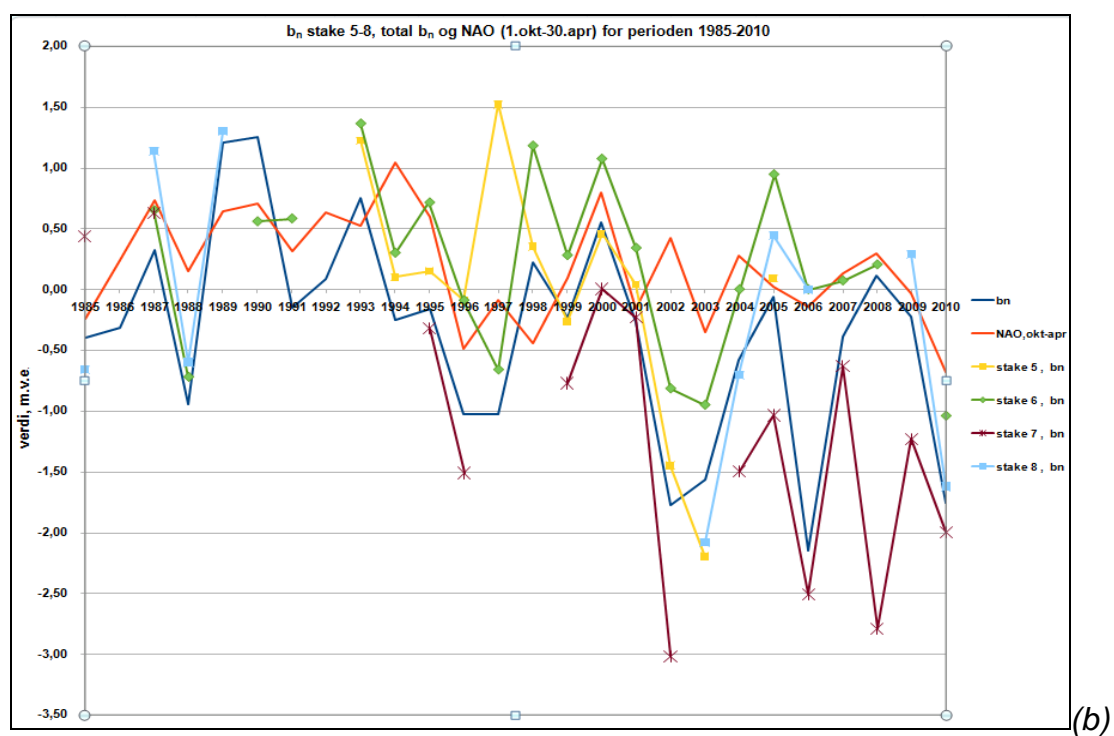
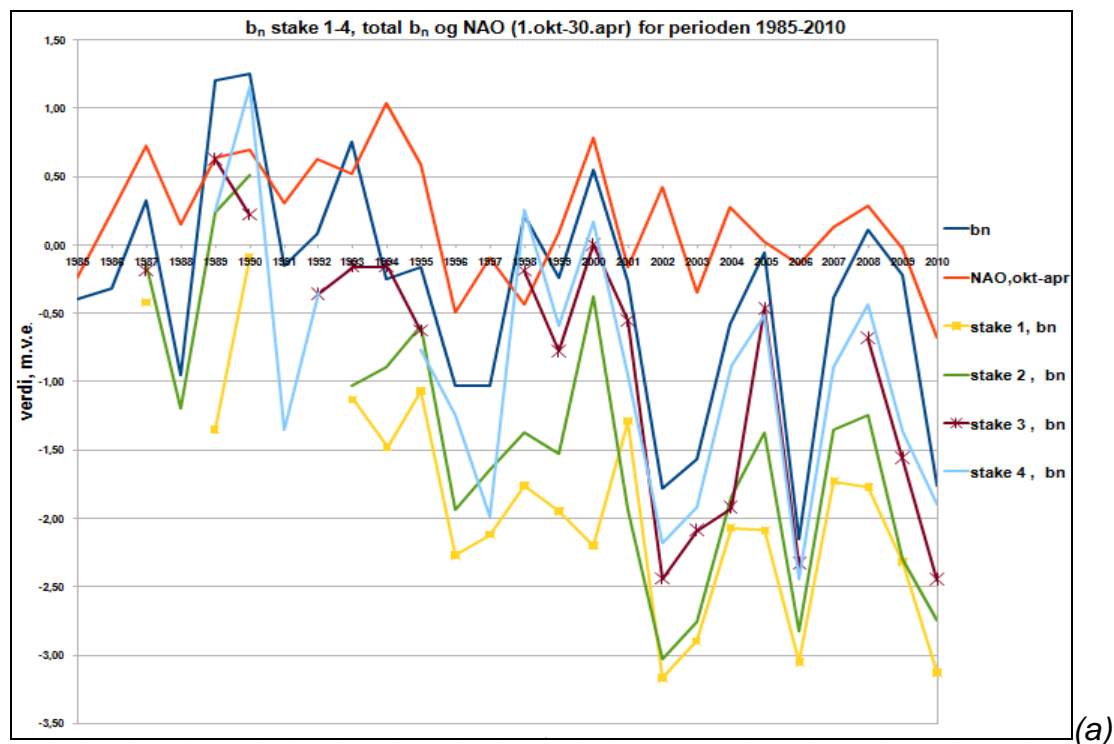
	Stake 5			Stake 6			Stake 7			Stake 8			Totalverdi			NAO
År	b_n	b_w	b_s	b_n	b_w	b_s	b_n	b_w	b_s	b_n	b_w	b_s	b_n	b_w	b_s	
1985							0,44	0,99	-0,54	-0,66	1,04	-1,70	-0,40	1,20	-1,60	-0,24
1986													-0,32	1,05	-1,37	0,24
1987				0,65	1,60	-0,95	0,63	1,85	-1,22	1,14	2,17	-1,03	0,32	1,55	-1,23	0,73
1988				-0,72	1,56	-2,28				-0,60	1,29	-1,89	-0,95	1,45	-2,40	0,15
1989						-0,50				1,30	2,30	-1,00	1,20	2,30	-1,10	0,64
1990				0,56	1,29	-0,73							1,25	2,60	-1,35	0,7
1991				0,58	1,31	-0,73							-0,15	1,26	-1,41	0,31
1992		1,59			1,72								0,08	1,61	-1,53	0,63
1993	1,22	1,39	-0,17	1,36	1,43	-0,10							0,75	1,81	-1,06	0,52
1994	0,10	1,48	-1,40	0,30	1,60	-1,30							-0,25	1,52	-1,77	1,04
1995	0,15	1,80	-1,65	0,71	2,30	-1,52	-0,32	1,70	-2,02				-0,16	1,77	-1,93	0,59
1996	<u>-0,09</u>	<u>0,74</u>	<u>-0,89</u>	-0,09	0,87	-0,78	-1,51	0,63	-2,14				-1,03	0,81	-1,84	-0,49
1997	<u>1,52</u>	<u>1,75</u>	<u>-2,51</u>	-0,66	2,10	-2,76							-1,03	1,75	-2,78	-0,09
1998	<u>0,35</u>	<u>2,35</u>	<u>-1,50</u>	<u>1,18</u>	<u>2,28</u>	<u>-0,73</u>							0,22	1,55	-1,33	-0,44
1999	<u>-0,26</u>	<u>1,39</u>	<u>-1,66</u>	<u>0,28</u>	<u>1,73</u>	<u>-1,45</u>	-0,77	1,53	-2,30				-0,24	1,67	-1,91	0,09
2000	0,46	1,69	-1,23	1,07	1,82	-0,75	0,01						0,55	2,04	-1,49	0,79
2001	<u>0,04</u>	<u>1,05</u>	<u>-1,31</u>	0,34	1,32	-0,78	-0,23	0,13	-0,36				-0,27	1,05	-1,32	-0,16
2002	<u>-1,45</u>	<u>0,96</u>	<u>-2,69</u>	<u>-0,82</u>	1,38	<u>-2,30</u>	-3,02	0,91	-3,94				-1,78	1,09	-2,87	0,42
2003	-2,20	0,58	-2,78	-0,95	1,17	-2,16		0,12		-2,08	1,15	-2,97	-1,57	1,11	-2,68	-0,35
2004				0,00	1,07	-1,07	-1,49	0,81	-2,31	-0,70	0,98	-1,68	-0,58	1,01	-1,59	0,28
2005	0,09	1,66	-1,57	<u>0,95</u>	<u>2,43</u>	<u>-1,49</u>	-1,04	1,64	-2,68	<u>0,44</u>	<u>1,77</u>	<u>-1,33</u>	-0,06	1,83	-1,89	0,02
2006				0,00	0,85	-0,85	-2,79	0,73	-3,52	0,00	0,85	-0,85	-2,15	0,86	-3,01	-0,14
2007				0,07	1,61	-1,49	-0,63	1,49	-1,79				-0,39	1,35	-1,74	0,13
2008				0,20	1,49	-1,29	-0,46	1,79	-2,25				0,11	1,99	-1,88	0,29
2009							-1,23	1,17	-2,41	0,29	1,29	-1,00	-0,22	1,60	-1,83	-0,03
2010				-1,04	0,77	-1,81	-2,00	0,71	-2,71	-1,62	0,84	-2,46	-1,76	0,79	-2,55	-0,68
r stake/tot b	0,66	0,75	0,90	0,82	0,59	0,78	0,67	0,59	0,79	0,94	0,89	0,45				
r ² stake/tot b	0,43	0,56	0,81	0,67	0,34	0,60	0,45	0,34	0,63	0,89	0,79	0,20				
r stake/NAO	0,19	0,23		0,44	0,27		0,27	0,61		0,83	0,80		0,59	0,59		
r ² stake/NAO	0,04	0,05		0,19	0,07		0,07	0,37		0,69	0,64		0,34	0,35		
Gj.snitt	-0,01	1,42	-1,61	0,19	1,53	-1,26	-1,10	1,03	-2,25	-0,28	1,37	-1,59	-0,34	1,49	-1,83	
St.avvik	1,01	0,48	0,75	0,71	0,46	0,67	1,13	0,54	1,05	1,16	0,53	0,70	0,86	0,46		

(b)

Tabell 6.1: (a) og (b) gjelder hhv. stakeposisjon 1-4 og stakeposisjon 5-8. Øverste del av tabellene inneholder beregnede b_n -, b_w - og b_s -stakeverdier i m.v.e. for de ulike stakeposisjonene i perioden 1985-2010, samt b_n -, b_w - og b_s -totalverdier beregnet for hele breen. Nederst er det snittverdier og standardavvik for b_n -, b_w - og b_s -seriene, NAO-indeks (1.okt.-30.apr) og korrelasjonskoeffisienter r og r^2 mellom b_n -, b_w - og b_s -stakeverdier og hhv. b_n -, b_w - og b_s -totalverdier (tot b) og NAO-indeks (1.okt.-30.apr). Verdiene i rød skrift har forfatteren beregnet, mens verdiene i sort skrift er beregnet av NVE-personell. Verdiene som er understreket og markert i kursiv er gjennomsnittlige verdier beregnet ut fra to eller flere separate staker ved samme stakeposisjon.



Figur 6.2: b_w -totalverdier (mørkeblå graf), NAO-indeks (1.okt-30.apr.) og b_w -stakeverdier i m.v.e. for stakeposisjonene 1-4 (a) og 5-8 (b) for perioden 1985-2010. Hvilke år som er inkludert i de ulike stakeseriene 1-8, varierer fra serie til serie, jmfør tabell 6.2.



Figur 6.3: b_n -totalverdier (mørkeblå graf), NAO-indeks (1.okt-30.apr) og b_n -stakeverdier i m.v.e. for stakeposisjonene 1-4 (a) og 5-8 (b) for perioden 1985-2010. Hvilke år som er inkludert i de ulike stakeseriene 1-8, varierer fra serie til serie, jamfør tabell 6.2.

Av tabell 6.1 og figur 6.2 går det fram at korrelasjonen mellom b_w -stakeverdier og b_w for hele breen er sterkest for stake 3 ($r = 0,96$), og også svært sterk for stake 4 ($r = 0,93$) og stake 2 ($r = 0,92$). Deretter følger stake 8, 1 og 5 med korrelasjon r på hhv. 0,89, 0,82 og 0,75. Korrelasjonskoeffisientene (b_w) for stake 6 og 7 skiller seg mest ut fra hele breen, begge med en lavere verdi på 0,59. Som figur 6.2 demonstrerer, så er det sjelden b_w -stakeverdier over 2 m.v.e. etter 1990, og det er kun for stake 5 og 6 dette forekommer, i 1995, 1998 og 2005. I 1989 og 1990 har også lavere staker, som stake 2, 3 og 4, samt stake 8, b_w -verdier over 2 m.v.e.

Det kan sees av figur 6.2 og standardavvikene oppgitt i tabell 1 at det er større spredning i stakeseriene 5-8 i de høyere delene av breen enn i stakeseriene 1-4 i de lavere delene. Stakeseriene 5-8 har et gjennomsnittlig standardavvik på 0,50, mens standardavviket i b_w -serien for hele breen er 0,46. Til sammenligning har stakeseriene 1-4 et gjennomsnittlig standardavvik på 0,43.

I b_n -stakeseriene 1985-2010 er det også noe større spredning for de høyereliggende stakene, med gjennomsnittlig standardavvik på 1,00 for stake 5-8 og 0,93 for stake 1-4. Det er tydelig i figur 6.2 og 6.3 at spredningen er mye større i b_n -seriene enn b_w -seriene, med rundt dobbelt så store standardavvik. Når det gjelder b_s , er det lavere gjennomsnittlig standardavvik (0,68) for stakeseriene 1-4, mot 0,79 for stake 5-8.

b_n -seriene for stake 8, 3 og 4 har sterkest korrelasjon med b_n for hele breen, med korrelasjon r på 0,94 for stake 8 og 0,93 for stake 3 og 4. Stake 5 ($r = 0,66$) og stake 7 ($r = 0,67$) har svakest korrelasjon, bak stake 1 og 6. Stake 6 og 1 har generelt hhv. høyest og lavest b_n i perioden. Stake 1 har en gjennomsnittlig b_n på -1,87 m.v.e. fra 1985 til 2010, mens stake 6 har et gjennomsnitt på +0,19 m.v.e.. Når det gjelder b_s -seriene, så har stake 3 sterkest korrelasjon ($r = 0,92$), mens det generelt er lavere korrelasjon for de høyereliggende stakene.

For hele breens b_w -serie 1985-2010 er det korrelasjon r med NAO (1.okt-30.apr) på 0,59 ($r^2 = 0,35$), altså noe høyere enn for hele perioden 1951-2010. For b_n -serien er

korrelasjonen 1985-2010 på samme nivå ($r = 0,59$, $r^2 = 0,34$). Korrelasjonen mellom vinterbalanse og NAO-indeks (1.okt-30.apr) er svak for de høytliggende stakene 5 ($r = 0,23$) og 6 ($r = 0,27$) i motsetning til de lavereliggende stakene. Stakeposisjonene 8, 2, 4, 7, 1 og 3 (i fallende rekkefølge) har alle sterk korrelasjon (i hht. klassifiseringen i Cohen (1988)) mellom b_w og NAO-indeks (1.okt-30.apr) med verdier for r på hhv. 0,80, 0,64, 0,64, 0,61, 0,60 og 0,50. Også for b_n -stakesseriene er korrelasjonen sterkere for de lavereliggende stakene enn de høyereliggende.

	Stake 1			Stake 2			Stake 3			Stake 4			Stake 6			Totalverdi			NAO
År	b_n	b_w	b_s	b_n	b_w	b_s	b_n	b_w	b_s	b_n	b_w	b_s	b_n	b_w	b_s	b_n	b_w	b_s	
1995	-1,07	1,53	-2,60	-0,59	1,65	-2,18	-0,63	1,57	-2,20	-0,76	1,51	-2,27	0,71	2,30	-1,52	-0,16	1,77	-1,93	0,59
1998	-1,76	0,95	-2,71	-1,37	1,14	-2,51	-0,19	1,41	-1,60	0,26	1,28	-1,02	<u>1,18</u>	<u>2,28</u>	<u>-0,73</u>	0,22	1,55	-1,33	-0,44
1999	-1,95	1,10	-3,05	-1,53	1,26	-2,79	-0,78	1,47	-2,25	-0,59	1,43	-2,02	<u>0,28</u>	<u>1,73</u>	<u>-1,45</u>	-0,24	1,67	-1,91	0,09
2000	-2,20	1,03	-3,23	-0,38	1,70	-2,16	0,00	1,85	-1,85	0,17	1,67	-1,50	1,07	1,82	-0,75	0,55	2,04	-1,49	0,79
2001	-1,29	0,55	-1,83	-1,94	0,72	-2,65	-0,56	0,76	-1,32	-0,95	0,99	-1,94	0,34	1,32	-0,78	-0,27	1,05	-1,32	-0,16
2002	-3,17	0,65	-4,06	-3,03	0,85	-4,11	<u>-2,45</u>	<u>0,86</u>	<u>-3,63</u>	-2,18	1,21	-3,35	<u>-0,82</u>	1,38	<u>-2,30</u>	-1,78	1,09	-2,87	0,42
2003	-2,90	0,80	-3,68	-2,76	0,88	-3,52	<u>-2,09</u>	<u>1,14</u>	<u>-3,11</u>	-1,91	0,95	-2,89	-0,95	1,17	-2,16	-1,57	1,11	-2,68	-0,35
2004	-2,07	0,62	-2,69	-1,85	0,73	-2,57	-1,93	0,67	-2,18	-0,88	0,74	-1,63	0,00	1,07	-1,07	-0,58	1,01	-1,59	0,28
2005	-2,09	1,32	-3,40	-1,38	1,48	-2,86	-0,47	1,68	-2,15	-0,51	1,59	-2,10	<u>0,95</u>	<u>2,43</u>	<u>-1,49</u>	-0,06	1,83	-1,89	0,02
2006	-3,05	0,58	-3,63	-2,83	0,64	-3,47	-2,33	0,72	-3,06	-2,44	0,70	-3,14	0,00	0,85	-0,85	-2,15	0,86	-3,01	-0,14
2008	-1,77	1,11	-2,88	-1,24	1,32	-2,57	-0,68	1,67	-2,35	-0,43	1,93	-2,37	0,20	1,49	-1,29	0,11	1,99	-1,88	0,29
2010	-3,13	0,68	-3,80	-2,75	0,71	-3,46	-2,45	0,84	-3,29	-1,89	0,70	-2,59	-1,04	0,77	-1,81	-1,76	0,79	-2,55	-0,68
r stake/tot b	0,81	0,84	0,82	0,92	0,95	0,86	0,95	0,96	0,95	0,98	0,96	0,93	0,84	0,79	0,63				
r ² stake/tot b	0,66	0,70	0,68	0,85	0,90	0,74	0,90	0,93	0,90	0,95	0,92	0,87	0,71	0,62	0,39				
r b/NAO	0,32	0,42		0,58	0,61		0,34	0,43		0,32	0,58		0,37	0,35		0,44	0,58		
r ² b/NAO	0,10	0,17		0,33	0,37		0,11	0,19		0,10	0,33		0,14	0,12		0,19	0,34		
Gj.snitt	-2,20	0,91	-3,13	-1,80	1,09	-2,90	-1,21	1,22	-2,41	-1,01	1,22	-2,23	0,16	1,55	-1,35	-0,64	1,40	-2,04	
St.avvik	0,71	0,32	0,63	0,89	0,39	0,60	0,95	0,43	0,71	0,90	0,41	0,69	0,77	0,57	0,54	0,81	0,43	0,60	

Tabell 6.2: Samme som Tabell 6.2, men kun for perioden 1995-2010 (unntatt 1996, 1997, 2007 og 2009, som mangler verdier for noen stakeposisjoner) og kun stakeverdier for stake 1, 2, 3, 4 og 6. De samme årene er her representert i alle de ulike dataseriene i tabellen.

Når det gjelder korrelasjon mellom b_w -stakeverdi og b_w for hele breen i utvalget av år fra 1995 til 2010 (tabell 6.2), har stake 3 ($r = 0,96$) også for perioden 1995-2010 svært sterk korrelasjon, på samme nivå som for stake 4 ($r = 0,96$) og stake 2 ($r = 0,95$). Stake 6 har også for denne perioden lavest korrelasjon av disse fem stakeposisjonene ($r = 0,79$), foran stake 1 ($r = 0,84$). Av figur 6.4 er det tydelig at

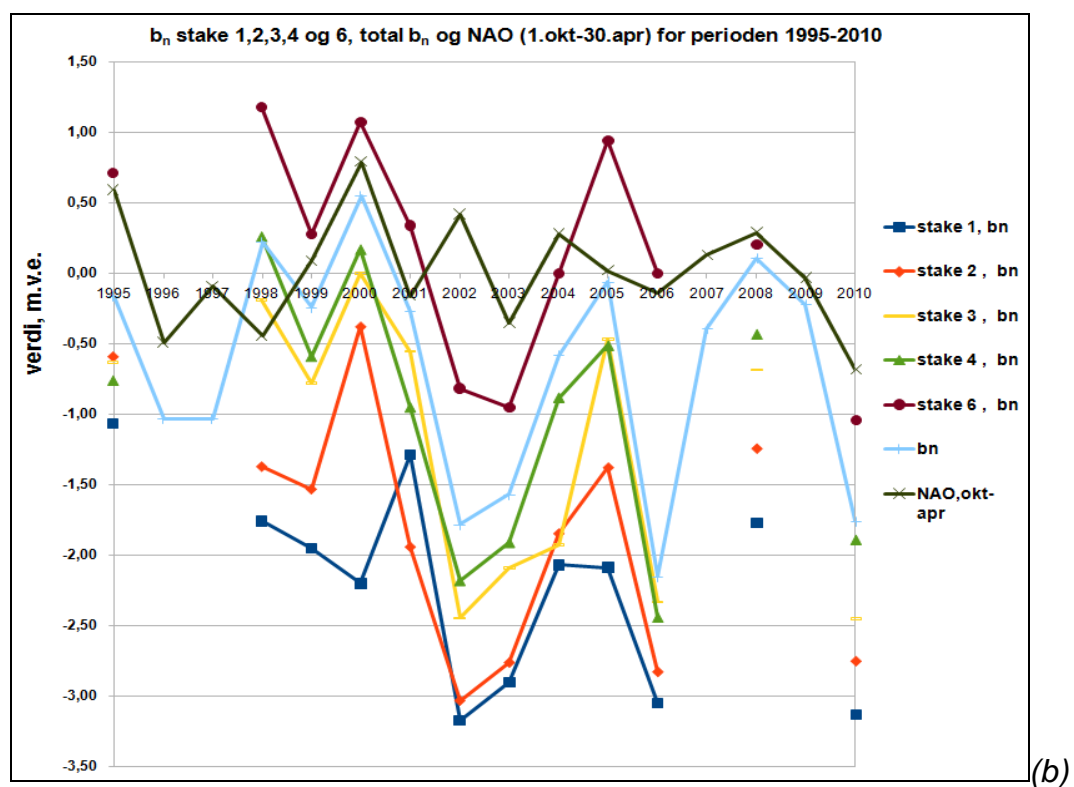
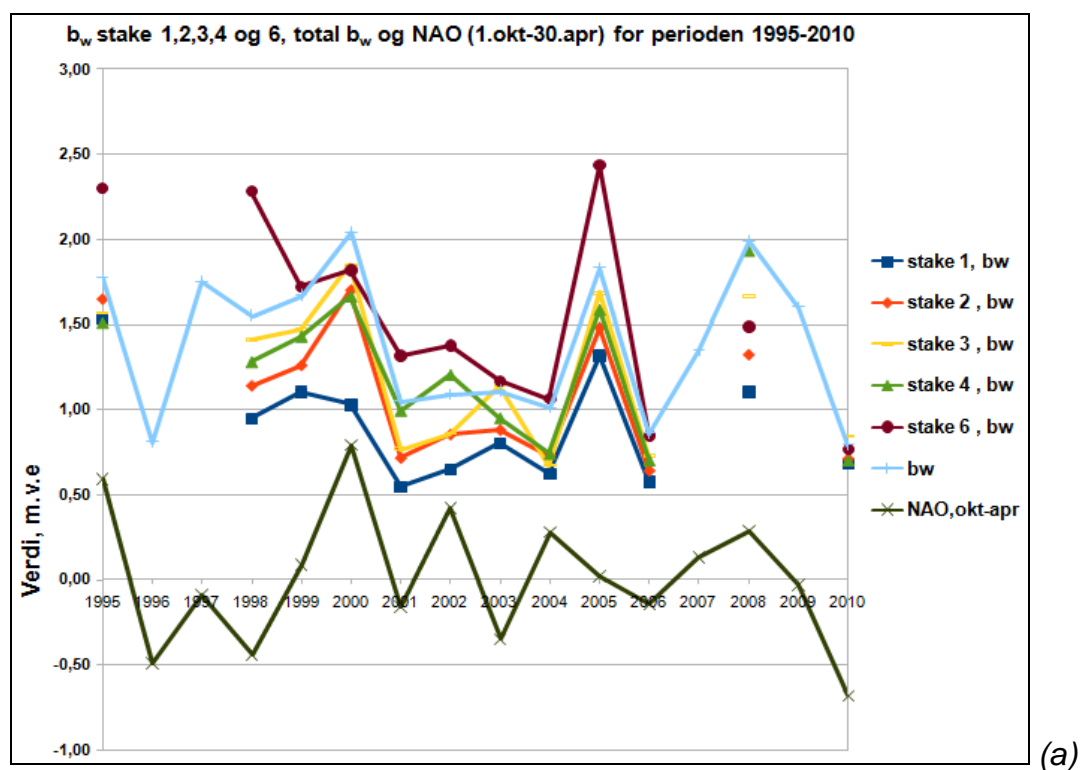
stake 6 har spesielt store positive avvik i forhold til b_w -totalverdien i de tre akkumulasjonssesongene 1995, 1998 og 2005, som alle er år med høyere b_w enn gjennomsnittet 1995-2010, jamfør tabell 6.2. b_w - for stake 6 er 30%, 47% og 33% høyere enn b_w for hele breen i hhv. 1995, 1998 og 2005.

Det er i snitt større akkumulasjon på stake 6 (ca. 1860 m.o.h. i 2010, ifølge Kjølmoen et al. (2010)) enn de lavereliggende stakene, og middelverdien av b_w -stakeseriene 1995-2010 øker med stakeposisjonenes høyde for alle stakene, unntatt stake 3 (ca. 1600 m.o.h. i 2010) og stake 4 (ca. 1700 m.o.h. i 2010), som har samme gjennomsnittlige b_w (1,22 m.v.e.) i perioden. Middelverdiene for b_n og b_s ved de ulike stakeposisjonene er også generelt mer positive (mindre negative for b_s) med økende høyde.

b_n -seriene 1995-2010 for stake 3 ($r = 0,96$), 4 ($r = 0,96$) og 2 ($r = 0,95$) har sterkest korrelasjon med b_n for hele breen. Stake 1 ($r = 0,81$) og stake 6 ($r = 0,84$) har noe svakere korrelasjon. Stake 1 har en gjennomsnittlig b_n på -2,20 m.v.e. fra 1995 til 2010, dvs. 0,33 m.v.e. lavere enn for 1985-2010, mens stake 6 har et gjennomsnitt på +0,16 m.v.e. fra 1995 til 2010, som er omtrent likt som for perioden 1985-2010.

Standardavvikene oppgitt i tabell 6.2 viser også at det er større spredning i b_w -stakeseriene for stake 6 (standardavvik 0,57) enn de lavere stakeposisjonene 1, 3, 4 og 5, med standardavvik på hhv. 0,32, 0,39, 0,43 og 0,41. Når det gjelder b_n har derimot stake 2, 3, og 4 høyere standardavvik enn stake 6, og for b_s har stake 6 lavest og stake 3 og 4 høyest standardavvik.

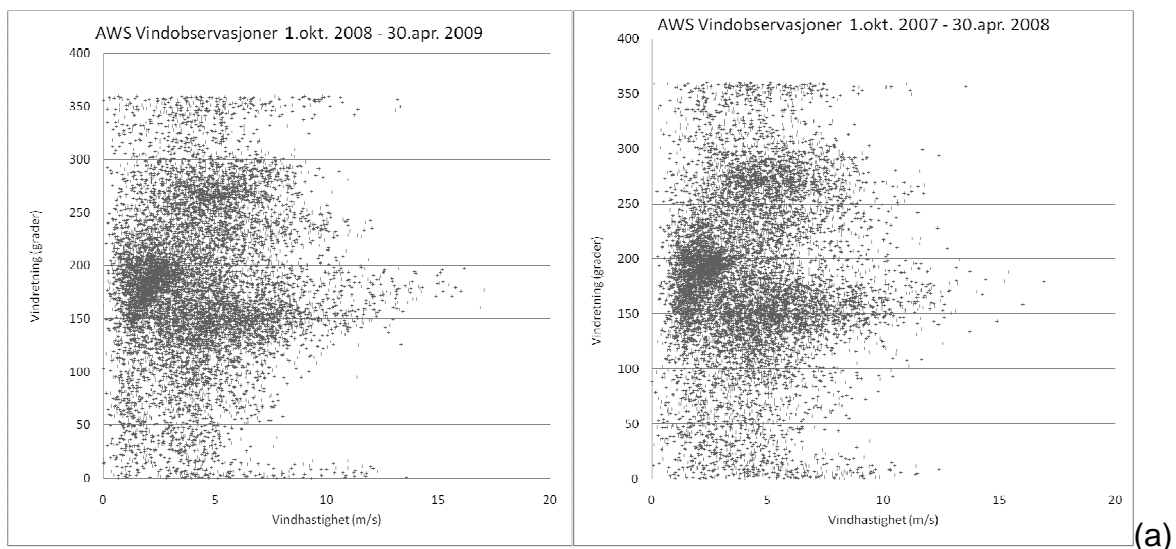
Av tabell 6.2 og figur 6.4 går det fram at korrelasjonen mellom vinterbalanse og NAO-indeks (1.okt-30.apr) også i dette utvalget av år er lavest for den høytliggende stake 6, med en moderat korrelasjon r på 0,35. Men det er her kun liten differanse mellom denne og stake 1 ($r = 0,42$) og 3 ($r = 0,43$), som i dette tilfellet bare har moderat korrelasjon med NAO-indeks (1.okt-30.apr). Stake 2 og 4 derimot har sterk korrelasjon r på hhv. 0,61 og 0,58. Også dette er imidlertid relativt lave korrelasjonsverdier i forhold til verdiene i tabell 6.1, der lengre tidsserier er brukt.

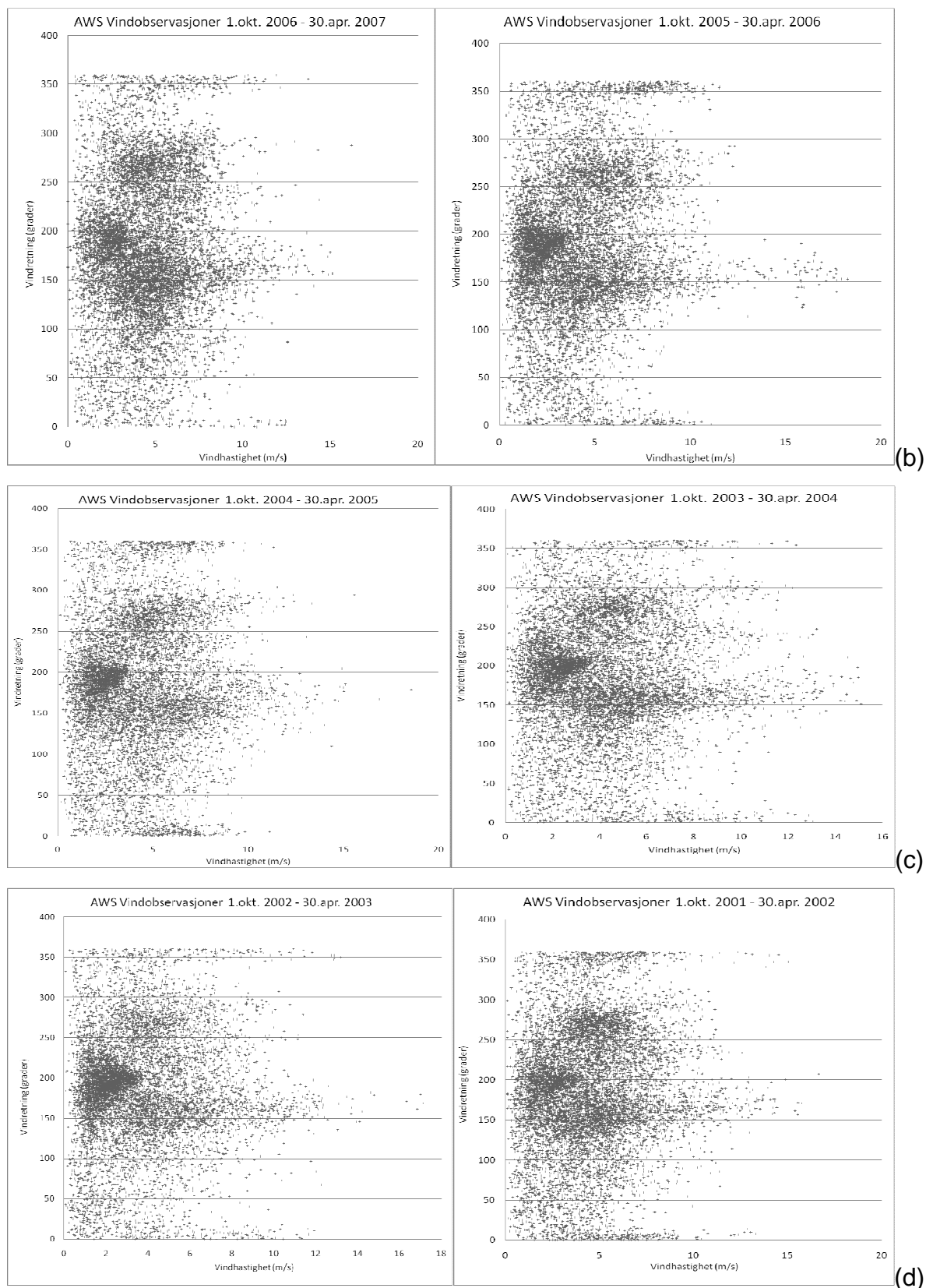


Figur 6.4: NAO-indeks (1.okt-30.apr) og hhv. stakeverdier for stake 1, 2, 3, 4 og 6 og totalverdier (lyseblå graf) for b_w (a) og b_n (b) i m.v.e. for perioden 1995-2010. Alle årene er representert for NAO-indeks og b-totalverdier, mens stakeseriene mangler verdier for 1996, 1997, 2007 og 2009.

6.2 Vinddata, temperaturdata og nedbørsdata

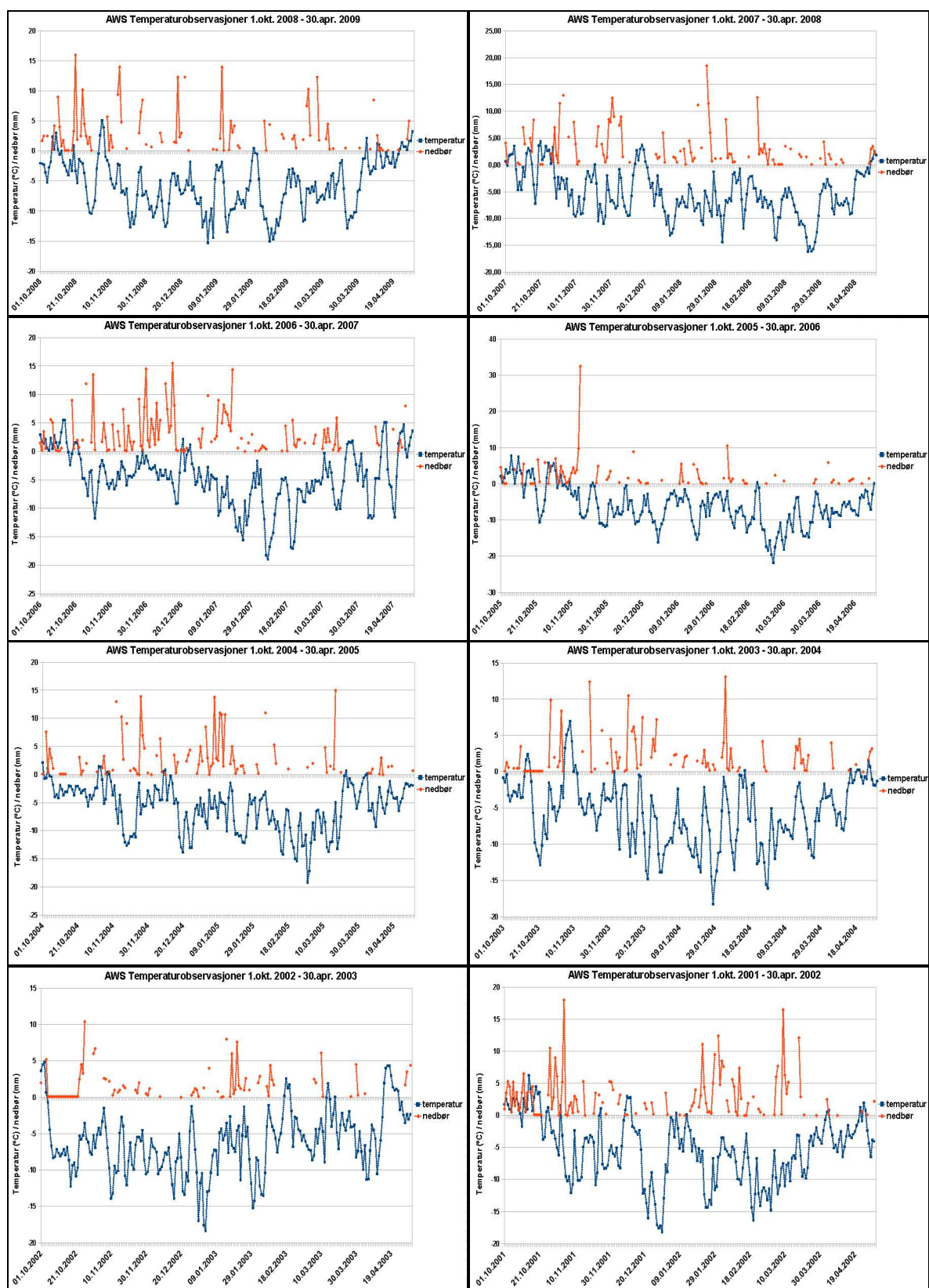
Figur 6.5 viser punktdiagrammer for vindhastighet og vindretning i akkumulasjonssesongene fra 2001 til 2010 basert på data fra Storbreen AWS. Det kan sees av diagrammene at det er noen hovedtendenser som går igjen de ulike årene i serien. Alle årene har et ganske likt mønster i vindretning og vindhastighet. Diagrammenes punkter er hvert år konsentrert i tre dominerende felt, som er: (1) sørlig vind fra ca. 160° til 220° med lav vindhastighet på ca. 0,5-4 m/s, (2) sørøstlig vind fra ca. 110° til 180° med høyere vindhastighet på ca. 2-10 m/s, (3) vestlig vind fra ca. 250° til 290° med vindhastighet på ca. 2-7 m/s. De sørlige vindene (1) har generelt størst frekvens. Det skal bemerkes at dette vindmønsteret kun er målt i ett punkt på breen, og at det er usikkert i hvilken grad dette representerer vindmønsteret på andre deler av breen.





Figur 6.5: Punktdiagrammer med halvtimesverdier for vindhastighet i m/s og vindretning (0-360°) fra AWS på Storbreen. Det er diagrammer for ulike akkumulasjonssesonger (okt-apr) for 2008 og 2009(a), 2006 og 2007(b), 2004 og 2005(c), 2002 og 2003(d). Det er ikke data for akkumulasjonssesongen 2009/2

Døgnmiddeltemperaturer fra AWS og nedbørsverdier fra Bøverdalen



figur 6.6: Diagrammer for døgnlige middeltemperaturer og nedbørsverdier 1.okt.-30.apr. for hver av de åtte akkumulasjonssesongene fra 2001 til 2009, basert på temperaturmålinger av Storbreen AWS og nedbørmålinger på værstasjonen Bøverdalen (701 m.o.h.), med beliggenhet ca. 1,5 mil nord-øst for Storbreen.

Diagrammene i Figur 6.6 viser plottede døgnlige middeltemperaturer fra Storbreens AWS og nedbørsverdier fra værstasjonen Bøverdalen. 1.okt. – 30. apr. for hver enkelt akkumulasjonssesong 2001-2009. Det er ett diagram for hver av de åtte akkumulasjonssesongene fra 2001 til 2009.

Tabell 6.3 lister opp antallet døgn hver akkumulasjonssesong med positive døgnmiddeltemperaturer 2001-2009, disse døgnenes summerte positive temperaturverdi for hver sesong, i tillegg til summert nedbør i Bøverdalen for døgnene med positive døgnmiddeltemperaturer. 2004-2005 skiller seg ut med spesielt få døgn (10) med positive middeltemperaturer, få summerte positive grader C (8,96) og kun 1 mm registrert nedbør disse døgnene. Også 2002/2003 og 2003/2004 hadde relativt kalde akkumulasjonssesonger og lite registrert nedbør. Akkumulasjonssesongene 2006/2007, 2001/2002, 2005/2006 og 2007/2008 (i fallende rekkefølge) hadde flest døgn med positive middeltemperaturer og også relativt høye nedbørsverdier for disse døgnene. Av grafene i figur 6.6 kan det sees at 2005/2006 hadde en varmere høst, mens 2006/2007 hadde en varmere vår.

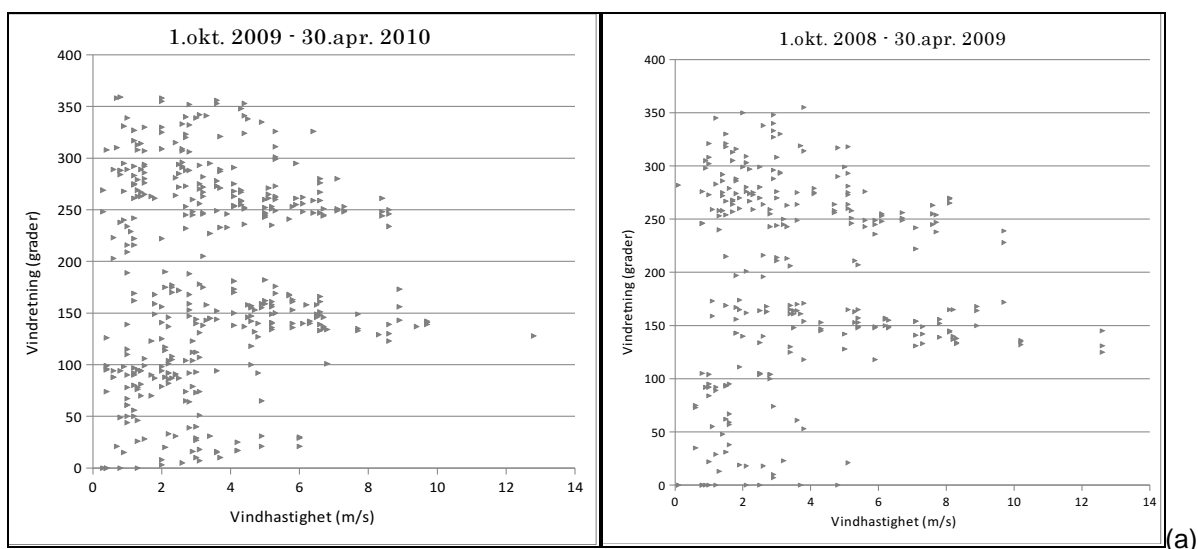
2006 /2007(32,2 mm) og 2001/2002 (52,7 mm) var år med relativt homogen snøfordeling. Året med størst variasjon i snødybde, 2004, har nest lavest registrert nedbørsmengde (4,8 mm). 2005, som også er et år med relativt stor romlig snødybdevariasjon hadde den laveste registrerte nedbørsmengden (1 mm) i perioden.

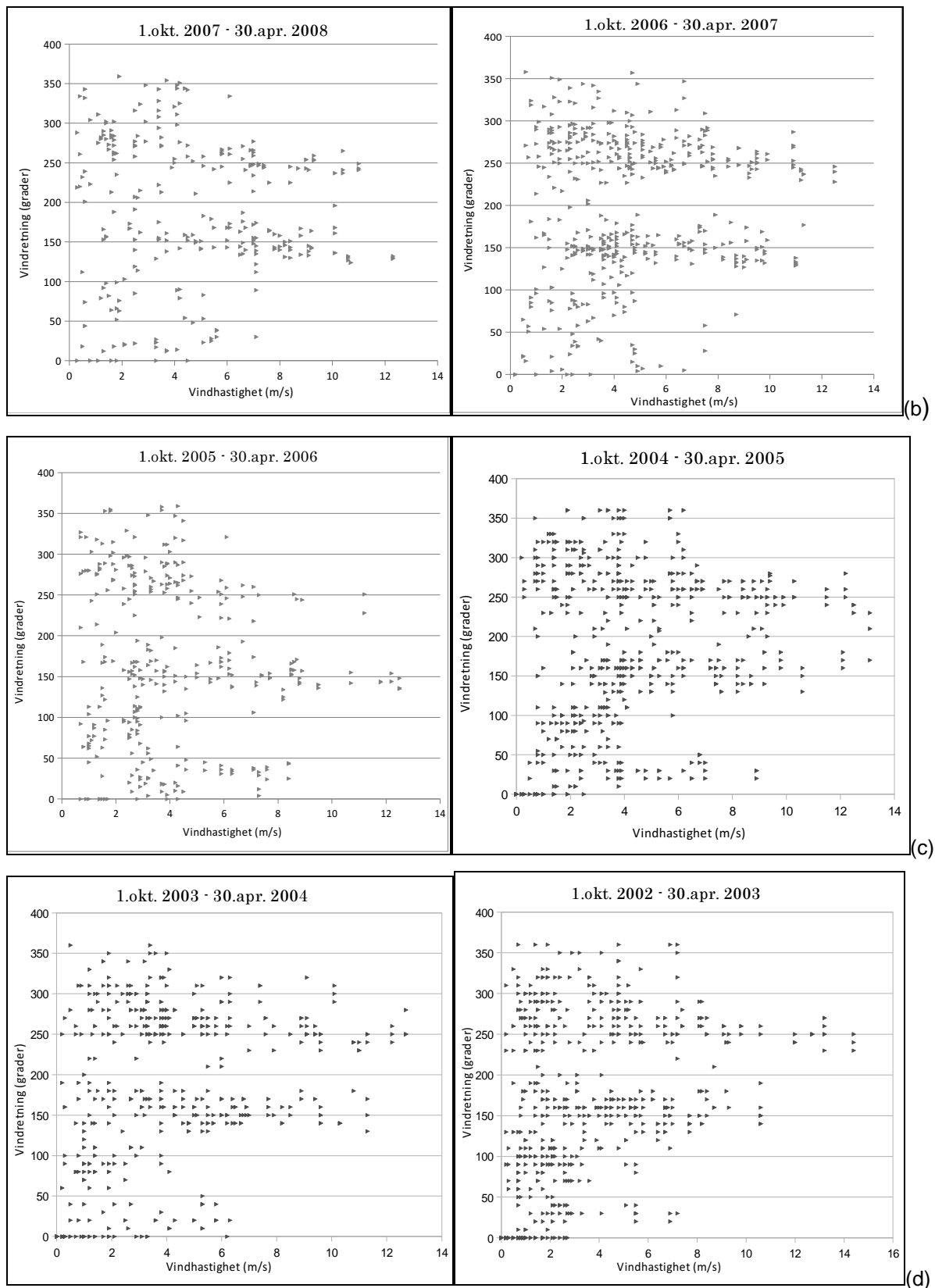
År	Ant. døgn med pos. middeltemp.,okt-apr	sum positive °C, okt-apr	sum nedbør(mm)
2001-2002	35	65,97	52,7
2002-2003	19	43,34	7,2
2003-2004	18	35,05	4,8
2004-2005	10	8,96	1
2005-2006	30	87,62	29,9
2006-2007	39	82,8	32,2
2007-2008	30	61,25	23,3
2008-2009	20	33,53	26,5

Tabell 6.3: Antall døgn med positive døgnmiddeltemperaturer hver av akkumulasjonssesongene (1.okt-30.apr) 2001-2009, summerte positive døgnmiddeltemperaturer for disse døgnene, samt summert nedbør for døgnene med positive døgnmiddeltemperaturer.

Figur 6.7 viser døgnverdier for gjennomsnittlig vindhastighet og vindretning akkumulasjonssesongene fra 2002 til 2010 basert på data fra den meteorologiske stasjonen Sognefjellhytta. Det er tydelig av diagrammene at det er noen hovedtendenser som går igjen de ulike årene i serien. De åtte akkumulasjonssesongene har alle et ganske likt mønster i vindretning og vindhastighet. En gjennomgående tendens i vinddataene for alle årene er dominerende vind rundt 240 - 300 grader (vind fra vest) og 140 - 180 grader (vind fra sør-sørøst) i en stor del av døgnene. Vindhastigheten ligger oftest mellom 0,5 og 10 m/s. Frekvensen og vindhastigheten ser ut til å være ganske likt fordelt mellom disse to dominerende retningene alle årene, med en liten overvekt av vestvinder.

Det er to tydelig forskjellige vindmønstre på Storbreens AWS og værstasjonen på Sognefjellhytta, der Sognefjellhytta har to tydelig dominerende vindretninger fra vest og sør-sørøst. Storbreens AWS derimot har et noe mer varierende mønster, men har størst frekvens av svake sørlige vinder, men også stor hyppighet av noe sterkere vinder fra de to retningene vest og sørøst.

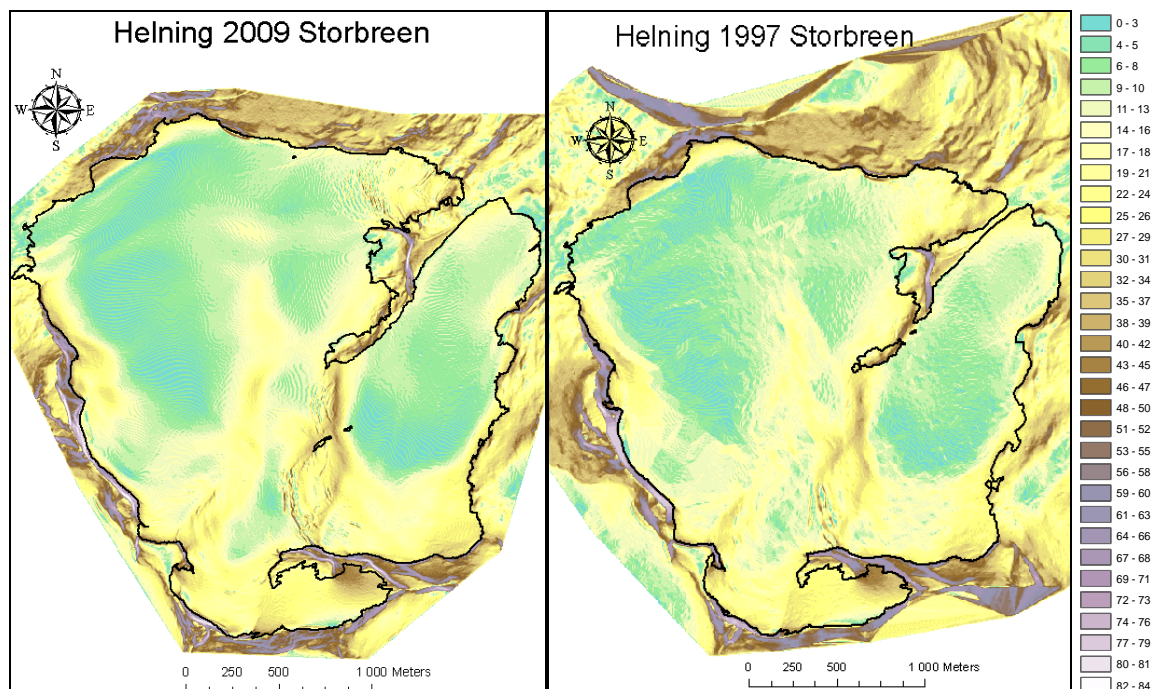




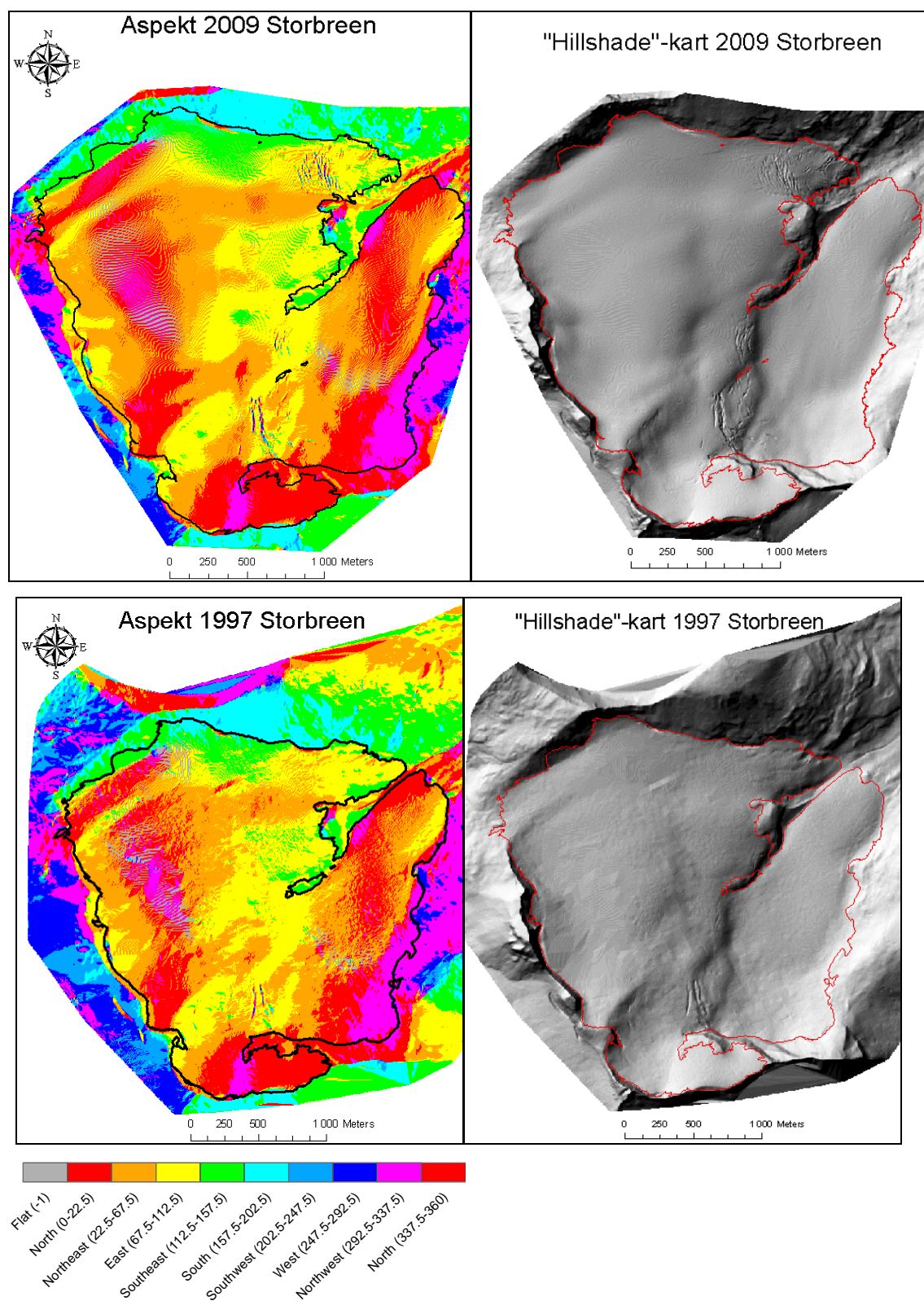
Figur 6.7: Punktdiagrammer med døgnaverdi for gjennomsnittlig vindhastighet i m/s (x-aksen) og vindretning (0-360°) fra den meteorologiske stasjonen Sognefjellhytta. Det er diagrammer for akkumulasjonssesongene 2010 og 2009(a), 2008 og 2007(b), 2006 og 2005(c), 2004 og 2003(d). Det er ikke data for akkumulasjonssesongen 2001/2002 (for sammenligning med Storbreens AWS)

6.3 Helning, aspekt og "hillshade"

Helningskart basert på høydemodeller fra 2009 og 1997 i rasterformat er vist i figur 6.8, mens aspektkart og "hillshade"-kart (med lyssetting fra nordvest) fra samme høydemodeller er vist i figur 6.9. Helningskartet illustrerer hvordan bratte fjellsider (brun og lilla farge) innlemmer omtrent hele breen. To unntak er brefronten i nordøst og et fjellpass i nordvest, som skiller seg ut ved at det ikke er avgrenset av en bratt helning ytterligere mot vest. De flate eller slake partiene som dekker store deler av den nordlige breen kommer tydelig fram med grønn farge på kartene, i kontrast til det brattere terrenget (gul og brun farge) som preger de sørlige delene av breen. Som aspektkartet demonstrerer, så er det nordlig (rød), nordøstlig (oransje) og østlig (gul) helningsretning på størstedelen av breen. I tilknytning til fjellsidene på nordsiden er det derimot i stor grad sørøstlig helning, og i fjellsiden i øst og sørøst er det et større område med nordvestlig helning.



Figur 6.8: Helningskart basert på høydemodeller fra 2009 (venstre) og 1997 (høyre) i rasterformat, klassifisert i 32 klasser fra 0 til 84 grader helning.

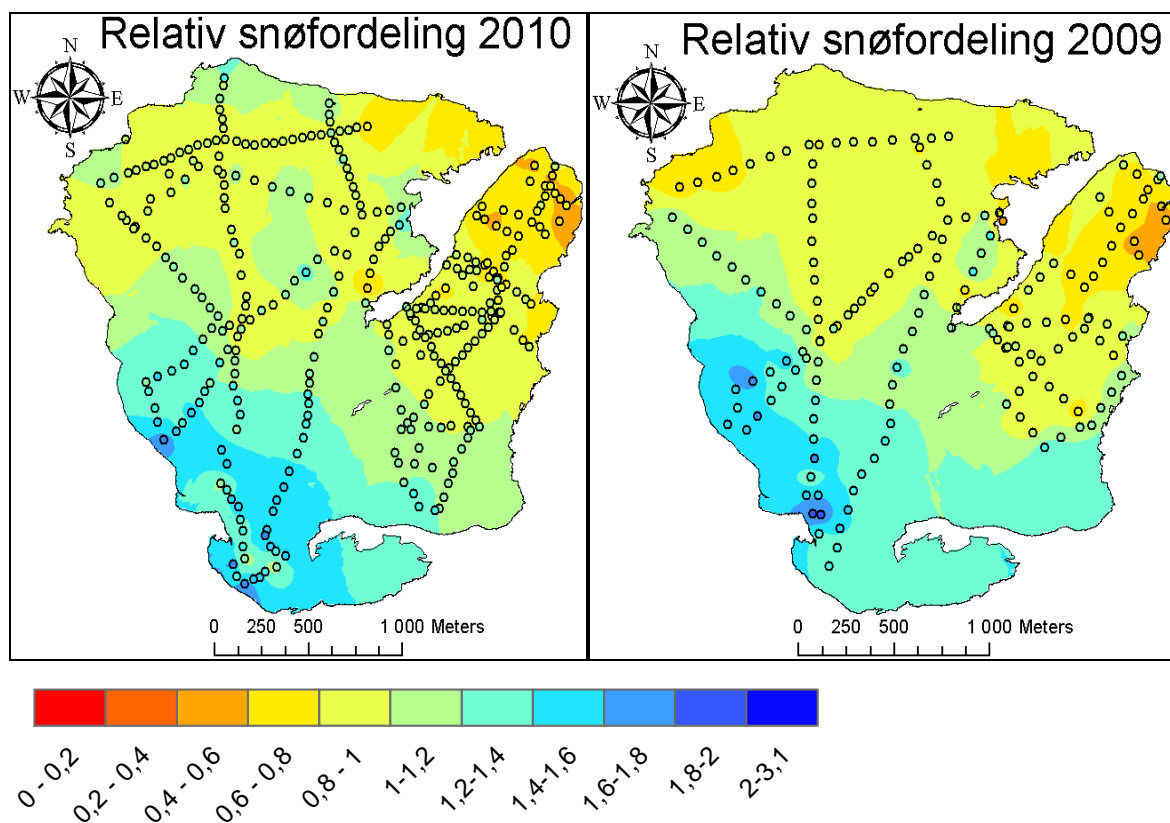


Figur 6.9: Aspektkart (venstre) og "hillshade"-kart med simulert lyssetting fra nordvest (høyre) basert på høydemodeller fra 2009 (øverst) og 1997 (nederst) i rasterformat. Aspektkartet er klassifisert i 10 klasser for ulike helningsretninger, vist i legenden nederst til venstre.

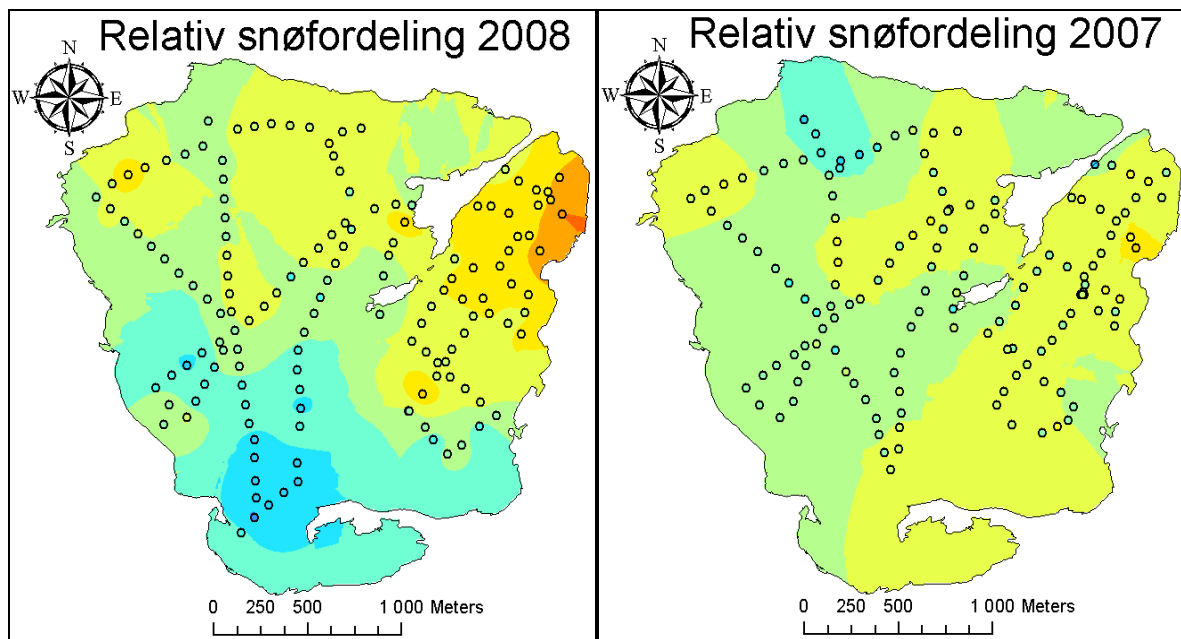
6.4 Relativ snødybde

Figur 6.10 viser snøfordelingskart basert på relativ snødybde for hvert av årene 1996-2010. Et generelt mønster på kartene er lave verdier for relativ snødybde i de lavere deler ned mot brefronten i nordøst og gradvis høyere verdier når man beveger seg vestover og sørvestover mot de høyeste delene av breen i sørvest. I de lavere deler ned mot brefronten er det generelt relative snødybdeverdier fra 0,8-1 og ned til 0,2-0,6 i noen år med større snødybdevariasjon, slik som 1996, 1998, 2004, 2005, 2006, 2008, 2009 og 2010, mens verdiene er fra 1-1,2 og opp mot maksimalverdiene i de høyeste områdene mot sørvest. Snøfordelingen har et i øyenfallende avvik fra høydefordelingen i breens nordvestre hjørne, hvor akkumulasjonen generelt er relativt lav i forhold høydenivået.

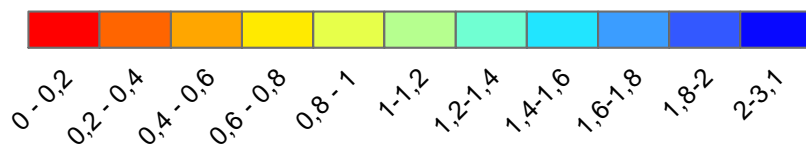
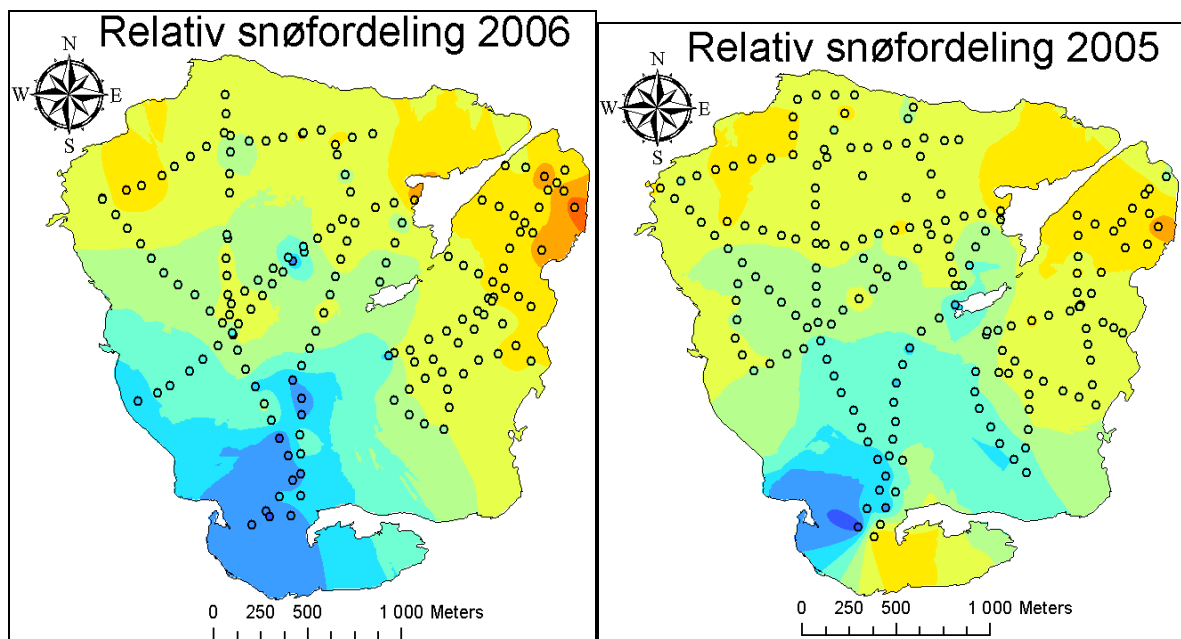
(a)



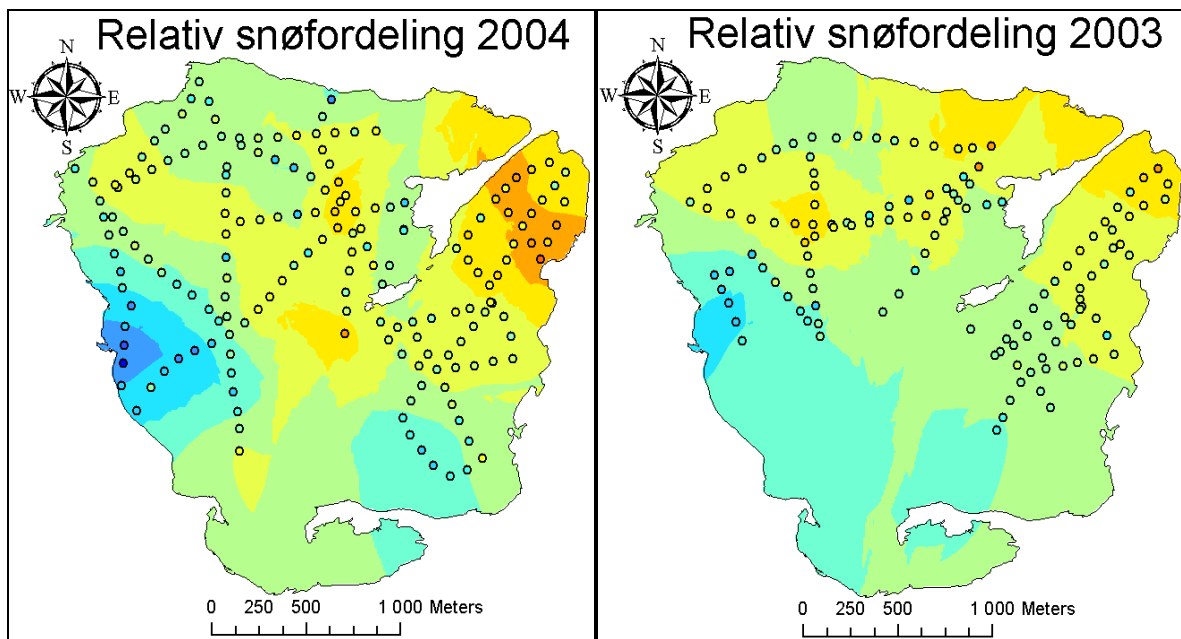
(b)



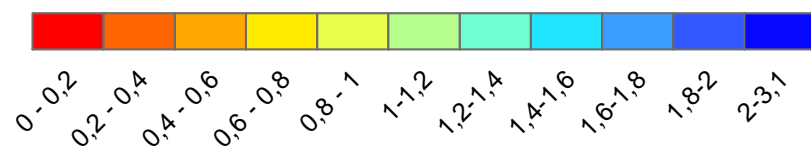
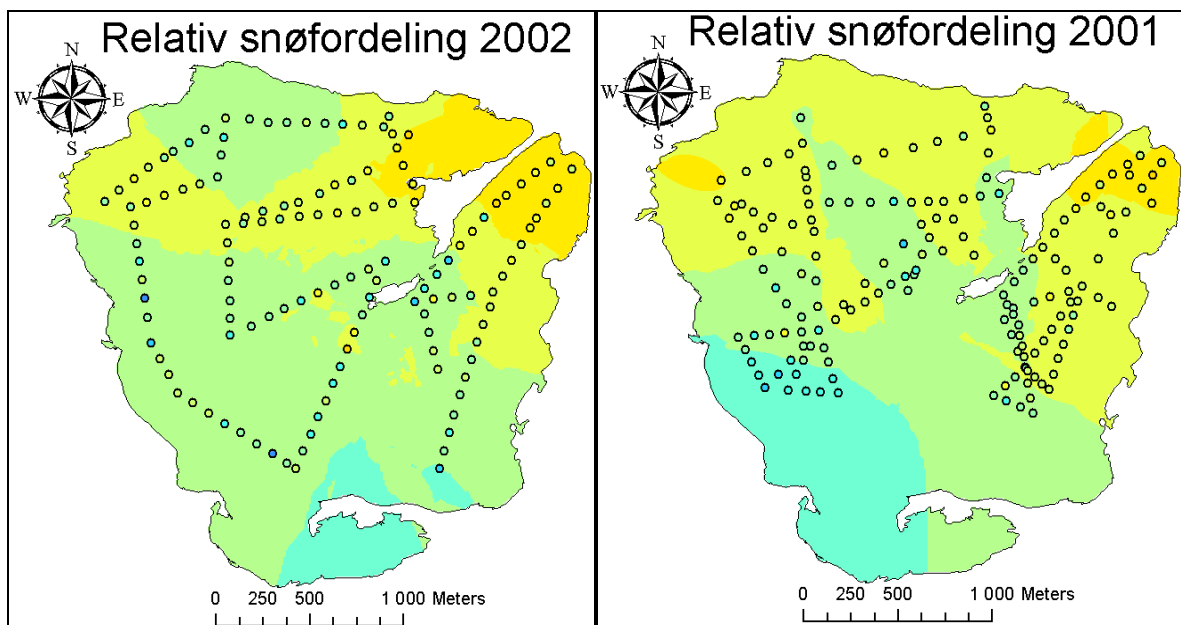
(c)



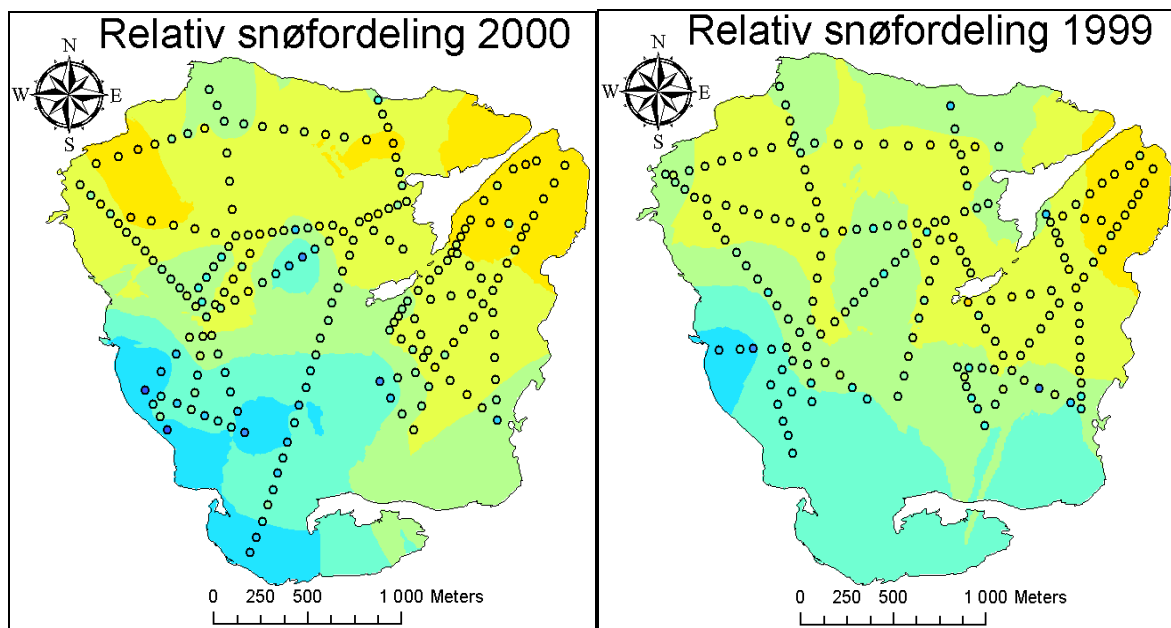
(d)



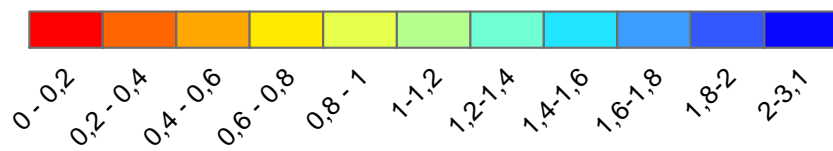
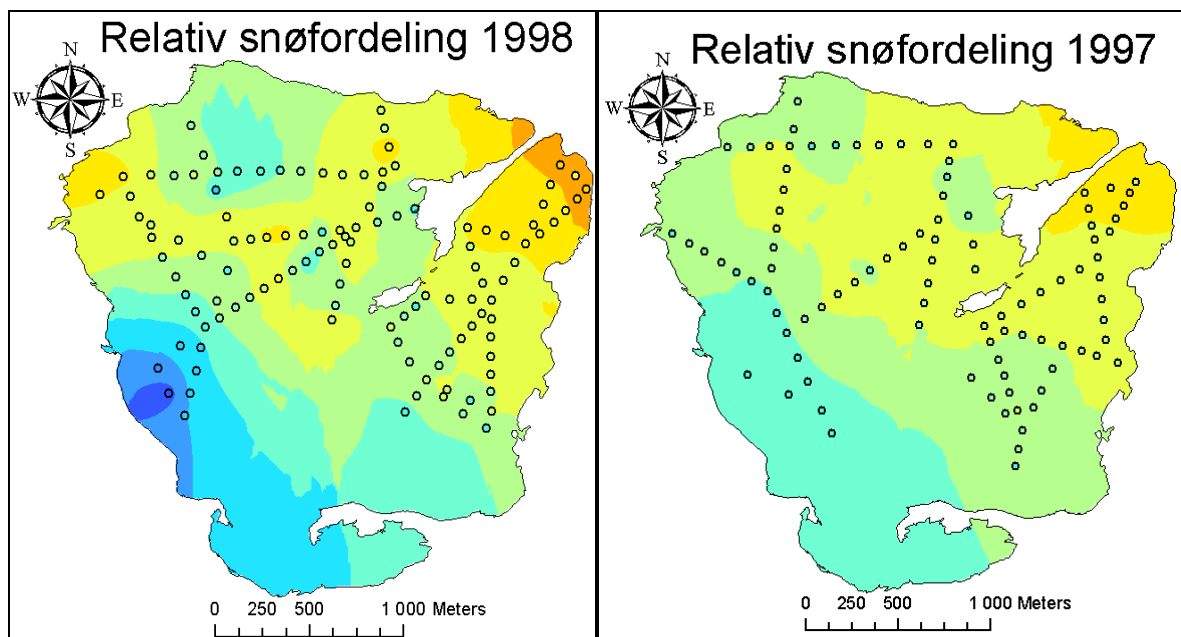
(e)



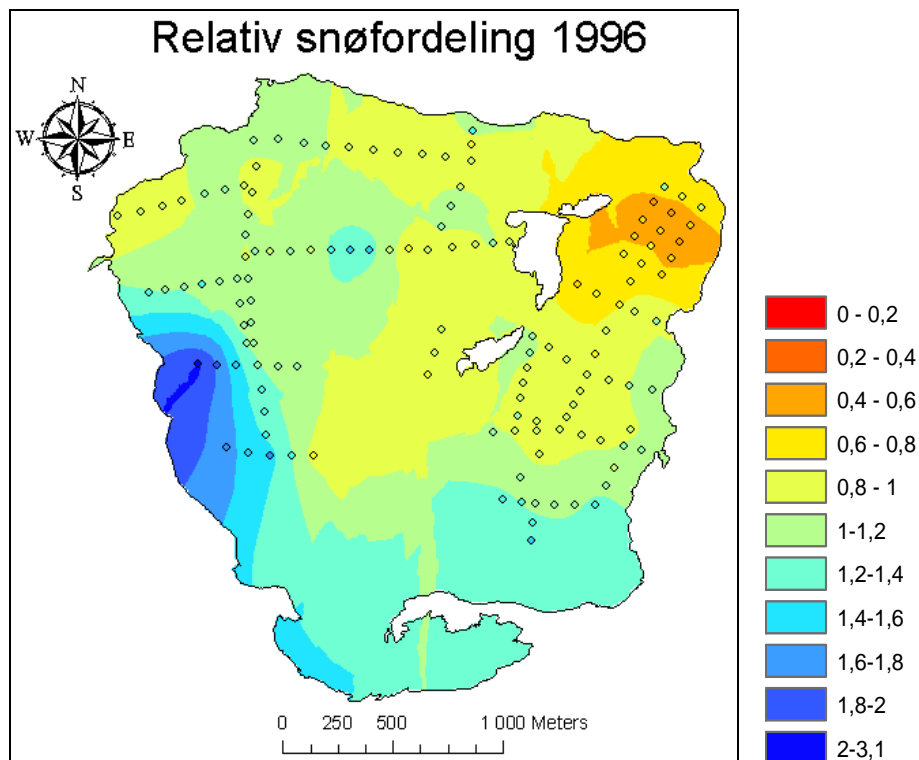
(f)



(g)



(h)



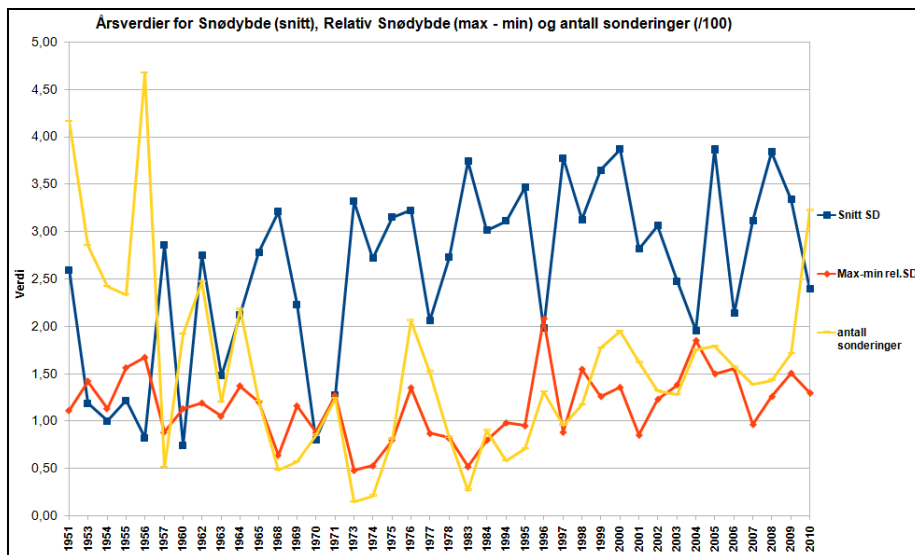
Figur 6.10: Snøfordelingskart basert på relativ snødybde for 2009-2010(a), (2007-2008(b), 2005-2006(c), 2003-2004(d), 2001-2002(e), 1999-2000(f), 1997-1998(g) og 1996(h). Sonderingspunktene (markert som små sirkler) verdier er interpolert ved kriging utover breens areal.

Tabell 6.4 lister opp intervallet for relativ snødybde (differanse mellom maksimumverdi og minimumverdi), gjennomsnittlige årsverdier for snødybde og antall årlige snødybdesonderinger. Tabellen viser også beregnet gjennomsnittsverdi for alle de 40 årene med digitale akkumulasjonskart for disse tre variablene, samt korrelasjonskoeffisient r for sammenhengen mellom antall årlige sonderinger og intervallet for relativ snødybde. De tre variablenes variasjon er plottet i figur 6.11.

Årene 1996 og 2004 skiller seg ut med spesielt høye intervall for relativ snødybde på hhv. 2,08 og 1,85. Av nyere år med gode akkumulasjonskart har 1997, 2001 og 2007 spesielt lave intervall for relativ snødybde på hhv. 0,88, 0,85 og 0,96. Fra 1951 til 2010 er det en korrelasjon r mellom intervallet for relativ snødybde og antallet sonderinger på 0,54, og en moderat (ifølge klassifisering av Cohen (1988)) negativ korrelasjon på 0,35 mellom gjennomsnittlig snødybde og intervall for relativ snødybde.

År	Snitt SD (m)	Max-min rel.SD	Antall sonderinger
1951	2,60	1,11	416
1953	1,19	1,42	285
1954	1,00	1,13	242
1955	1,22	1,56	233
1956	0,83	1,67	467
1957	2,86	0,88	51
1960	0,75	1,13	192
1962	2,75	1,19	247
1963	1,48	1,05	120
1964	2,12	1,37	218
1965	2,78	1,20	121
1968	3,21	0,64	48
1969	2,23	1,16	57
1970	0,81	0,88	85
1971	1,27	1,27	124
1973	3,32	0,48	15
1974	2,72	0,53	21
1975	3,15	0,80	81
1976	3,22	1,35	206
1977	2,06	0,87	152
1978	2,73	0,82	83
1983	3,74	0,52	27
1984	3,01	0,80	90
1994	3,11	0,98	58
1995	3,46	0,95	71
1996	1,98	2,08	131
1997	3,77	0,88	96
1998	3,13	1,55	117
1999	3,65	1,26	177
2000	3,87	1,35	195
2001	2,82	0,85	162
2002	3,06	1,23	132
2003	2,48	1,38	128
2004	1,95	1,85	175
2005	3,86	1,50	179
2006	2,14	1,55	157
2007	3,11	0,96	139
2008	3,84	1,26	143
2009	3,34	1,50	171
2010	2,39	1,29	322
Gj.snitt	2,58	1,19	153,35
r (ant. målepkt./max-min rel.SD)		0,54	0,54
r (Snitt SD/max-min rel.SD)	-0,35		

Tabell 6.4: Intervallet for relativ snødybde, gjennomsnittlige verdier for snødybde (Snitt SD, benevnelse: m), og antall snødybdesonderinger for hvert av de 40 årene med digitale akkumulasjonskart. Nederst er gjennomsnittsverdi over de 40 årene for disse tre variablene, og korrelasjonskoeffisient r for sammenhengen mellom antall årlige sonderinger og intervallet for relativ snødybde.



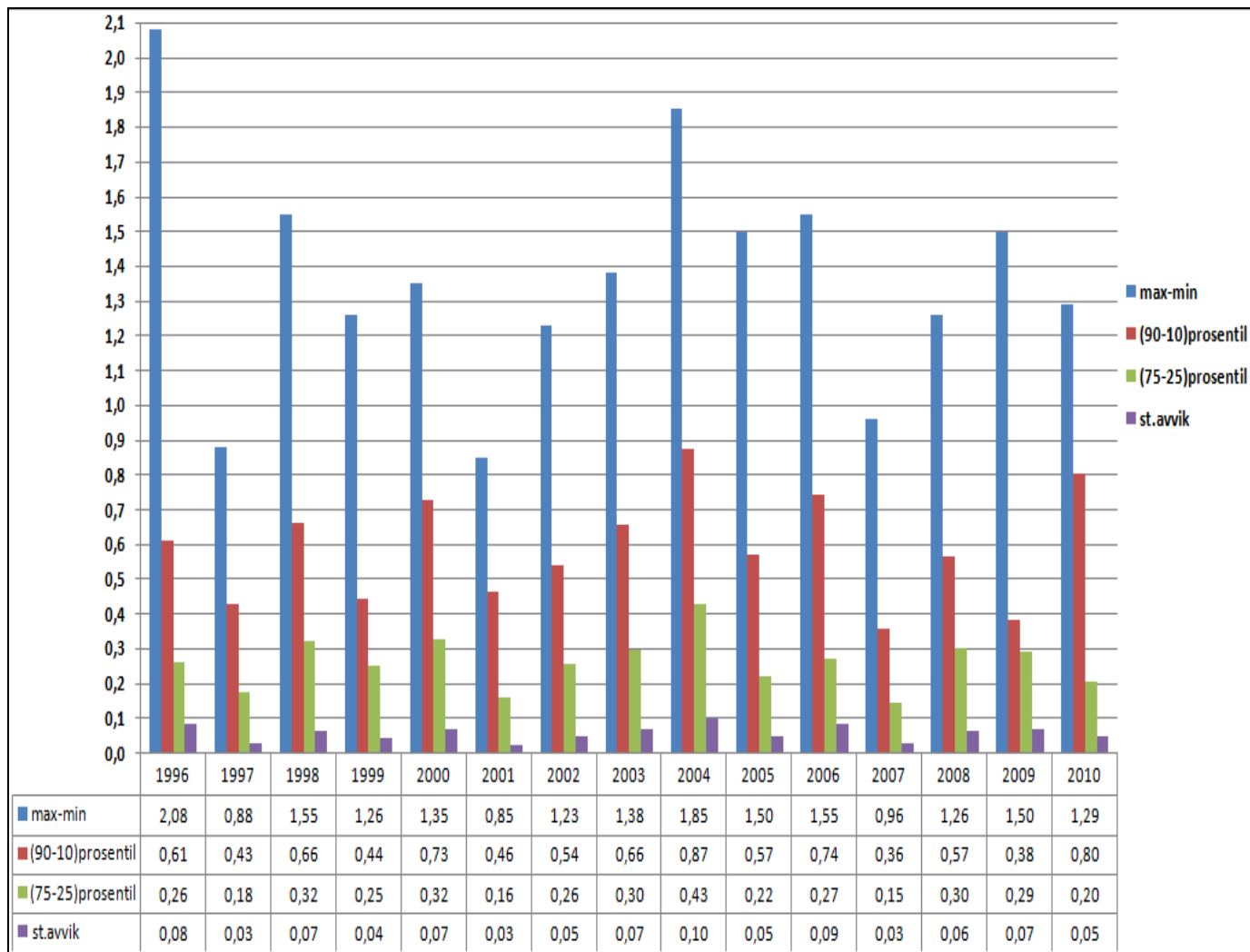
Figur 6.11: Gjennomsnittlige årsverdier for snødybde (Snitt SD) (benevnelse: m) er plottet i blå graf. Intervallet for relativ snødybde i hvert år er plottet i rød graf. Antall sonderinger (dividert med 100) er plottet i gul graf.

Figur 6.12 kan gi et inntrykk av den kvantitative forskjellen mellom årene fra 1996 og 2010, med hensyn på hvorvidt det er relativt jevn og homogen snødybde eller store variasjoner mellom forskjellige deler av breen. Figuren viser diagram og datatabell for perioden 1996 til 2010 med verdier for differanse mellom 90-prosentil og 10-prosentil, differanse mellom 75-prosentil og 25-prosentil, intervall for relativ snødybde, og standardavvik for alle sonderingene hvert år. 1997, 2001, 2002 og 2007 skiller seg ut i figuren som år med relativt lave verdier for disse variablene, mens 2004, 2006, 2010 og 2000 har høyere verdier. Det indikerer større romlig variasjon i de sistnevnte årene.

For perioden 1996-2010 er beregnet negativ korrelasjon r mellom gjennomsnittlig snødybde og de fire indikatorene (1) differanse mellom 90-prosentil og 10-prosentil, (2) intervall for relativ snødybde, og (3) standardavvik og (4) differanse mellom 75-prosentil og 25-prosentil hhv. (1) 0,54, (2) 0,51 (3) 0,51 og (4) 0,22. Den negative korrelasjonen tyder på at år med relativt lav vinterbalanse generelt har større romlig variasjon i snødybde enn år med relativt høy vinterbalanse.

Korrelasjonskoeffisientene kan tyde på at differanse mellom 75-prosentil og 25-prosentil er den dårligste av de fire indikatorene.

Standardavvik, intervall og differanse mellom prosentiler 1996-2010

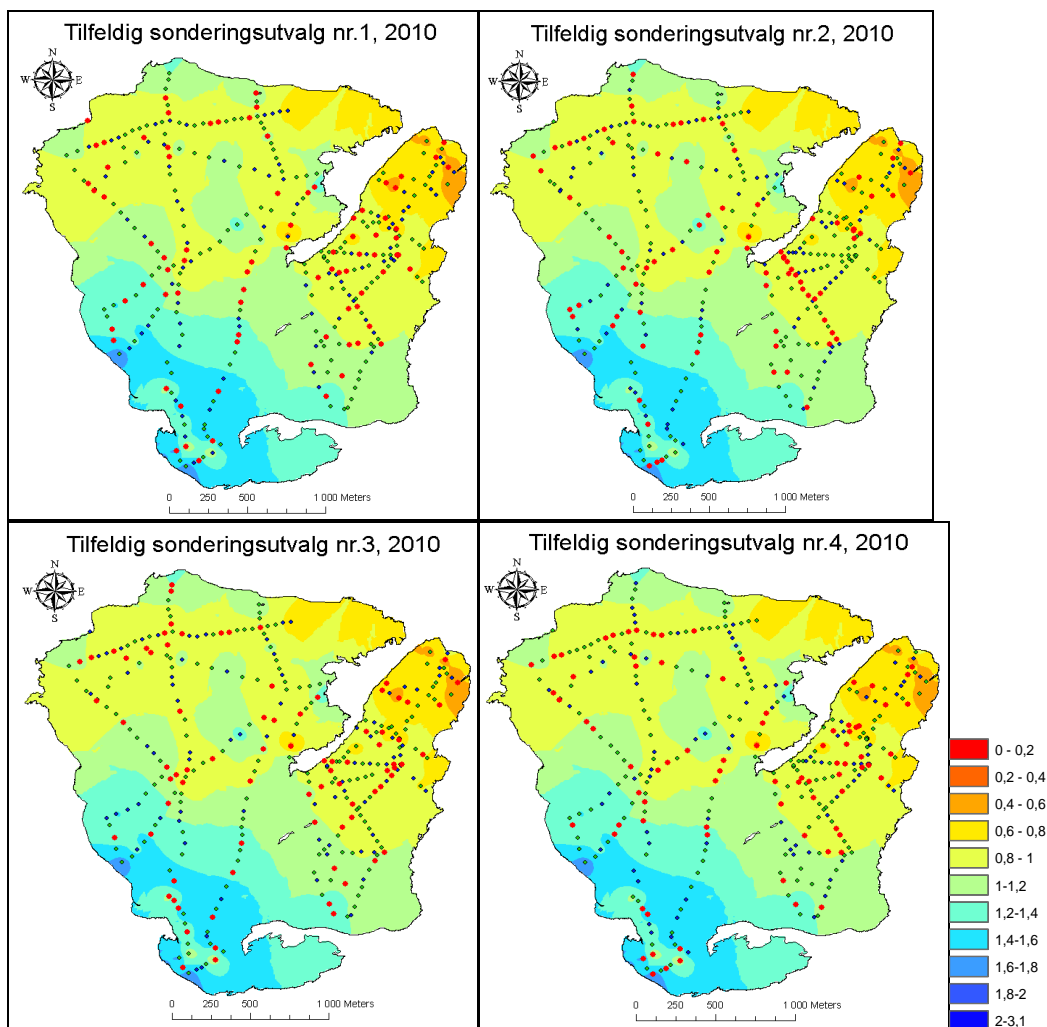


Figur 6.12: Stolpediagram og datatabell med verdier for differanse mellom 90-prosentil og 10-prosentil, differanse mellom 75-prosentil og 25-prosentil, intervall for relativ snødybde og standardavvik, for perioden 1996 til 2010.

Av snøfordelingskartene i figur 6.10 er det tydelig at 1997, 1999, 2001, 2002 og 2007 har relativt homogen snøfordeling, med mindre ekstreme positive verdier for relativ snødybde i de høyere deler og mindre ekstreme negative verdier i de lavere deler av breen. 2007 og 2002 skiller seg ut i kartene ved at disse årene ikke har det typiske mønsteret med høyere akkumulasjon også i de sørvestlige delene av breen.

6.5 Massebalanseberegning for forskjellige utvalg av sonderingspunkter

Romlig fordeling for de fire tilfeldige utvalgene av sonderinger som er benyttet er illustrert i figur 6.13.



Figur 6.13: Sonderingspunktene i tilfeldige utvalg 1-4 fra 2010. Sonderinger markert i rødt tilhører utvalget på 25 % av alle sonderingene, mens utvalget på 50 % innebefatter både de røde og blå punktene. Sonderinger som ikke tilhører de respektive tilfeldige utvalgene er markert i grønt. Sonderingspunktene er overlagt snøfordelingskart basert på interpolerte verdier for relativ snødybde 2010. Legenden viser skalaen for relativ snødybde.

Tabell 6.5 lister opp utvalgenes spesifikke vinterbalanse i hvert høydeintervall og summert for hele breen. Intervallverdiene utgjør punktene som er plottet med høydeintervall i figur 6.14, 6.15 og 6.18 (til venstre) for alle utvalgene.

	Tilfeldig utvalg 1		Tilfeldig utvalg 2		Tilfeldig utvalg 3		Tilfeldig utvalg 4		Utvalg, helning		Alle sond.
Intervall +/- 25m	Utv.1, 50% (m.v.e.)	Utv.1, 25% (m.v.e.)	Utv.2, 50% (m.v.e.)	Utv.2, 25% (m.v.e.)	Utv.3, 50% (m.v.e.)	Utv.3, 25% (m.v.e.)	Utv.4, 50% (m.v.e.)	Utv.4, 25% (m.v.e.)	>10° heln. (m.v.e.)	<=10° heln. (m.v.e.)	Alle sond. (m.v.e.)
2025	1,19	1,19	1,48	1,48	1,48	1,48	1,19	1,19	1,33	1,33	1,33
1975	1,14	1,19	1,18	1,27	1,13	1,10	1,23	1,26	1,15	1,15	1,15
1925	1,27	1,30	1,19	1,11	1,21	1,28	1,20	1,26	1,22	1,24	1,23
1875	1,04	1,00	1,07	1,00	1,05	0,99	1,07	0,95	1,21	0,99	1,05
1825	0,87	0,86	0,84	0,86	0,85	0,89	0,84	0,83	1,05	0,84	0,87
1775	0,86	0,83	0,87	0,87	0,86	0,85	0,87	0,88	0,93	0,83	0,86
1725	0,84	0,85	0,84	0,81	0,82	0,86	0,84	0,86	0,93	0,81	0,84
1675	0,82	0,80	0,83	0,83	0,85	0,90	0,92	0,96	0,90	0,69	0,87
1625	0,90	0,88	0,91	0,90	0,93	0,93	0,91	0,85	0,95	0,89	0,91
1575	0,81	0,79	0,81	0,79	0,81	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
1525	0,73	0,75	0,76	0,78	0,71	0,68	0,74	0,74	0,77	0,72	0,73
1475	0,59	0,61	0,61	0,58	0,60	0,61	0,64	0,63	0,57	0,64	0,61
1425	0,49	0,49	0,66	0,84	0,67	0,84	0,66	0,48	0,60	0,60	0,60
1400-2050 m	11,54	11,55	12,04	12,12	11,96	12,22	11,92	11,70	12,42	11,55	11,86

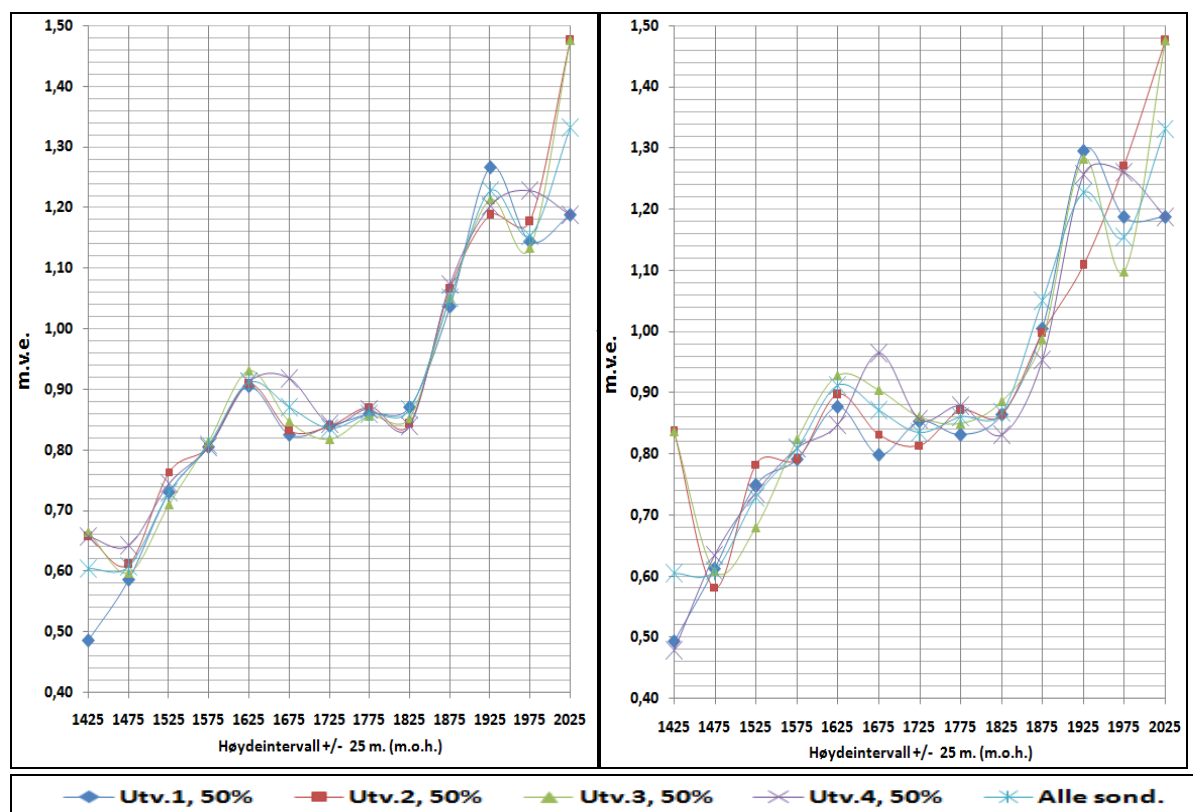
Tabell 6.5: Spesifikk vinterbalanse (i m.v.e.) i hvert høydeintervall og totalverdier fra 1400 til 2050 m.o.h. for de tilfeldige utvalgene 1-4 (50 % og 25 % av alle sonderingene), utvalget i områder med mer enn 10° helning, utvalget i områder med opptil 10° helning og alle sonderingene. For utvalget med opptil 10° helning er det ingen sonderinger i tre høydeintervaller (markert i rødt). I disse tilfellene er det brukt middelerverdier for alle sonderingene.

Kurven for alle sonderingene (f.eks i figur 6.18) viser en jevn økning i spesifikk vinterbalanse på ca. 0,3 m.v.e. fra 1400-1450 m.o.h. til 1600-1650 m.o.h. Deretter er det en jevn minking på i underkant av 0,1 m.v.e. opp til 1700-1750 m.o.h., før en flat tendens opp til 1800-1850 m.o.h. Herfra og opp til 1900-1950 m.o.h. er det en bratt økning i b_w på ca. 0,35 m.v.e., før et fall på i underkant av 0,1 m.v.e. opp til 1950-2000 m.o.h. Herfra opp til 200-2050 m.o.h. er det igjen en bratt økning på ca 0,15 m.v.e.

Som figur 6.14 viser, så stemmer 50 %-utvalgenes kurver, og i noe mindre grad 25%-utvalgenes kurver, godt overens med hovedtendensene i kurven for alle sonderingene. Men det er tydelig at det er større spredning mellom de ulike tilfeldige kurvene i noen høydeintervaller enn andre, og at det er større spredning

mellom de ulike 25 %-utvalgenes intervallverdier enn mellom de ulike 50 %-utvalgene. Dette er tydelig i høydeintervallene med relativt få sonderinger i hvert utvalg, slik som 1400-1450 m.o.h (1 og 2 sonderinger), 1950-2000 m.o.h. (3 og 5 sonderinger), 1900-1950 m.o.h. og 1650-1700 m.o.h. (5 og 10 sonderinger). Fra 2000 til 2050 m.o.h. er det kun én verdi (se tabell 5.1) i begge disse utvalgene, så her er spredningen svært stor i begge utvalg. Det er bemerkelsesverdig at det er større spredning 1650-1700 m.o.h. enn 1450-1500 m.o.h. (4 og 9 sonderinger) på tross av at det er færre sonderinger i sistnevnte intervall.

Spesifikk vinterbalanse (2010) for tilfeldige utvalg, 50 % og 25 % av alle sonderingene

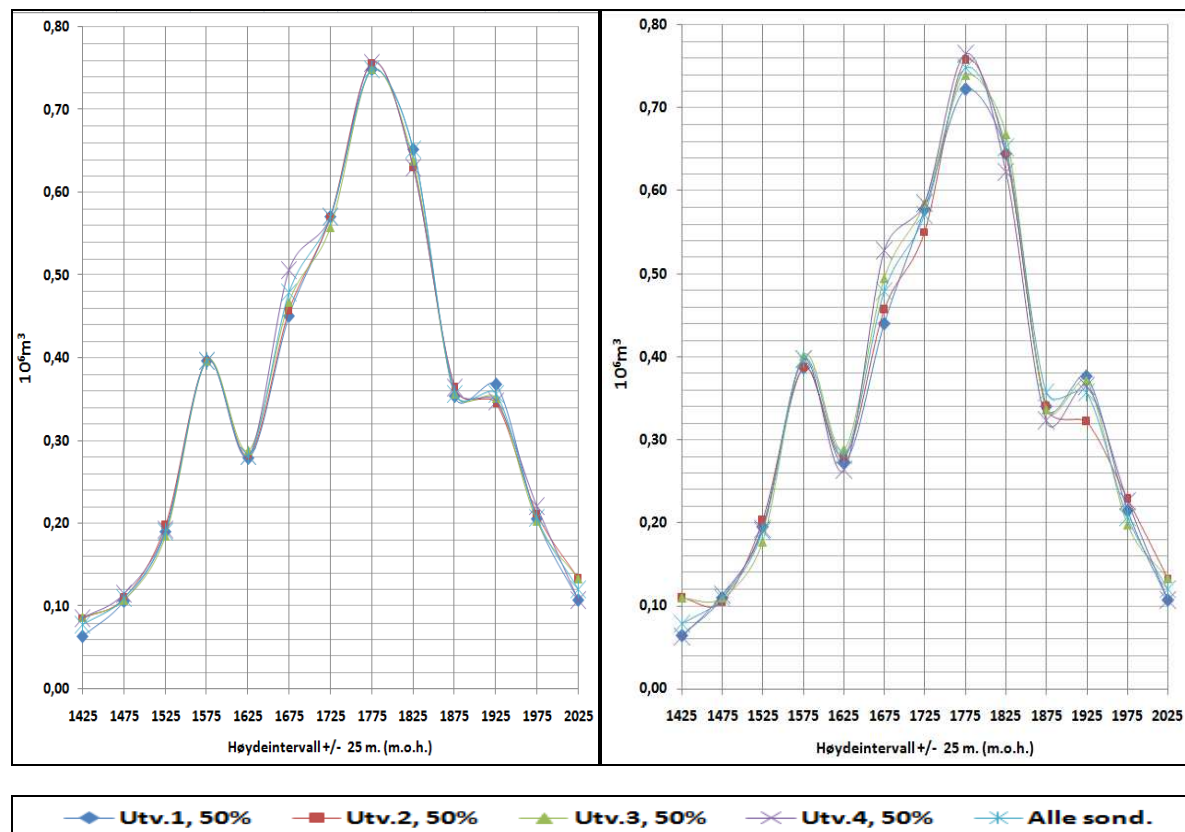


Figur 6.14: Plott for spesifikk vinterbalanse (i m.v.e) for de tilfeldige utvalgene 1-4 og alle sonderingene. Venstre: utvalgene med 50 % av alle sonderingene. Høyre: utvalgene med 25 % av alle sonderingene.

Den totale spesifikke massebalansen beregnet for hele breen (heretter kalt total b_w) er 11,86 m.v.e. For de spesifikke b_w -verdiene beregnet for hele breen fra 50 %-

utvalgene 1-4, er det maksimale og minimale avviket fra total b_w på 0,32 og 0,06 m.v.e., og det gjennomsnittlige avviket for disse fire utvalgene er 0,17 m.v.e. Til sammenligning er det for de spesifikke b_w -verdiene beregnet for hele breen fra de fire 25 %-utvalgene et maksimalt og minimalt avvik fra total b_w på 0,36 og 0,16 m.v.e., og det gjennomsnittlige avviket for disse er 0,27 m.v.e.

Volumvinterbalanse (2010) for tilfeldige utvalg, 50 % og 25 % av alle sonderingene



Figur 6.15: Plott for volumvinterbalanse (i $10^6 m^3$) for de tilfeldige utvalgene 1-4 og alle sonderingene. Venstre: utvalgene med 50 % av alle sonderingene. Høyre: utvalgene med 25 % av alle sonderingene.

Verdiene for utvalgenes volumvinterbalanse i hvert høydeintervall og summert for hele breen er vist i Tabell 6.6. Intervallverdiene utgjør punktene som er plottet med høydeintervall i figur 6.14, 6.15 og 6.18 (til høyre) for alle utvalgene.

Som man kan se av plottene for de tilfeldige utvalgenes volumvinterbalanse, så har mye av variasjonen i b_w -plottene, særlig i det laveste og de tre høyeste intervallene,

blitt utjevnet som følge av at spredningen er stor i intervaller med lite areal. Figur 6.17 og tabell 6.7 viser standardavvik for de tilfeldige utvalgenes middelerverdier (fire i hvert høydeintervall) som er plottet i massebalansediagrammene. Figuren demonstrerer at det både for 50 %-utvalgene og 25 %-utvalgene er størst spredning i intervallet 1650-1700 m.o.h. etter multipliseringen av b_w med areal.

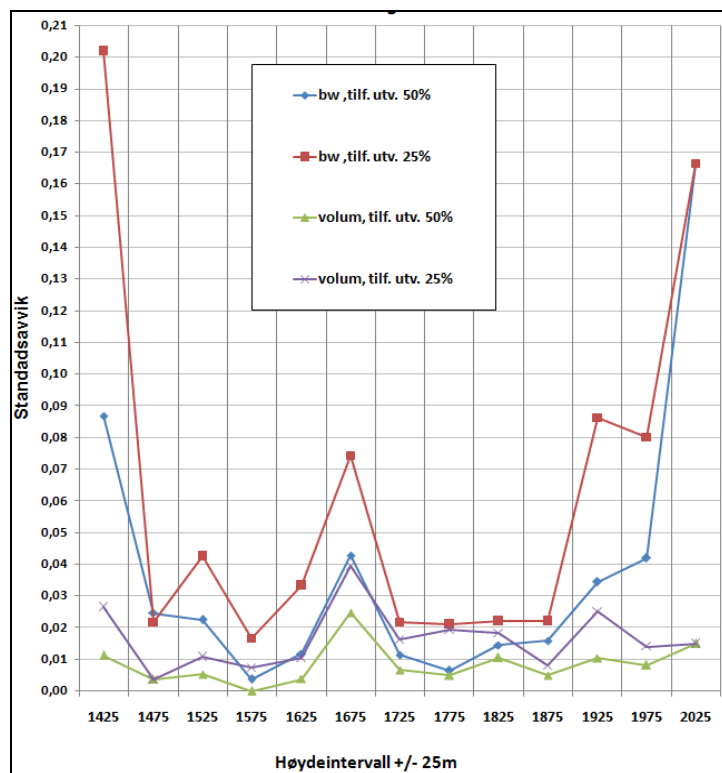
Standardavvikene for alle sonderingene og alle utvalgene i figur 6.19 og tabell 6.8 viser at den store spredningen fra 1650 til 1700 m.o.h. ikke bare gjelder de tilfeldige utvalgene, men alle sonderingene.

Intervall ± 25m	Areal, km ²	Tilf. utvalg 1		Tilf. utvalg 2		Tilf. utvalg 3		Tilf. utvalg 4		Utvalg, helning		Alle sond.
		Utv.1, 50% (10 ⁶ m ³)	Utv.1, 25% (10 ⁶ m ³)	Utv.2, 50% (10 ⁶ m ³)	Utv.2, 25% (10 ⁶ m ³)	Utv.3, 50% (10 ⁶ m ³)	Utv.3, 25% (10 ⁶ m ³)	Utv.4, 50% (10 ⁶ m ³)	Utv.4, 25% (10 ⁶ m ³)	>10° heln. (10 ⁶ m ³)	≤10° heln (10 ⁶ m ³)	Alle sond. (10 ⁶ m ³)
2025	0,09	0,11	0,11	0,13	0,13	0,13	0,13	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12
1975	0,18	0,21	0,21	0,21	0,23	0,20	0,20	0,22	0,23	0,21	0,21	0,21
1925	0,29	0,37	0,38	0,35	0,32	0,35	0,37	0,35	0,37	0,35	0,36	0,36
1875	0,34	0,35	0,34	0,36	0,34	0,36	0,34	0,36	0,32	0,41	0,34	0,36
1825	0,75	0,65	0,65	0,63	0,65	0,64	0,67	0,63	0,62	0,79	0,63	0,65
1775	0,87	0,75	0,72	0,76	0,76	0,75	0,74	0,76	0,77	0,81	0,72	0,75
1725	0,68	0,57	0,58	0,57	0,55	0,56	0,58	0,57	0,58	0,63	0,55	0,57
1675	0,55	0,45	0,44	0,46	0,46	0,47	0,50	0,51	0,53	0,50	0,38	0,48
1625	0,31	0,28	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,26	0,29	0,28	0,28
1575	0,49	0,40	0,39	0,40	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
1525	0,26	0,19	0,20	0,20	0,20	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19
1475	0,18	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,12	0,11	0,10	0,12	0,11
1425	0,13	0,06	0,06	0,09	0,11	0,09	0,11	0,09	0,06	0,08	0,08	0,08
1400-2050 m	5,12	4,49	4,45	4,54	4,52	4,52	4,61	4,58	4,55	4,89	4,36	4,55

Tabell 6.6: Volumvinterbalanse beregnet fra gjennomsnittlige sonderingsverdier i hvert høydeintervall og fra 1400 til 2050 m.o.h. for de tilfeldige utvalgene 1-4 (50 % og 25 % av alle sonderingene), utvalget i områder med mer enn 10° helning, utvalget i områder med opptil 10° helning og alle sonderingene. For utvalget med opptil 10° helning er det ingen sonderinger i tre høydeintervaller (markert i rødt). I disse tilfellene er det brukt middelerverdier for alle sonderingene.

Den totale volumvinterbalansen beregnet for hele breen (heretter kalt total volumvinterbalanse) er $4,55 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. For volumvinterbalansen beregnet for hele breen fra 25 %-utvalgene 1-4, er det minimale og maksimale avviket fra total volumvinterbalanse 0,00 og $0,10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (0 - 2,2 % av total volumvinterbalanse), og det gjennomsnittlige avviket er $0,05 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ for disse utvalgene. For volumvinterbalansen beregnet for hele breen fra de fire 50 %-utvalgene er det et minimalt og maksimalt avvik fra total volumvinterbalanse på 0,01 og $0,06 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, og det gjennomsnittlige avviket er $0,03 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ for disse utvalgene.

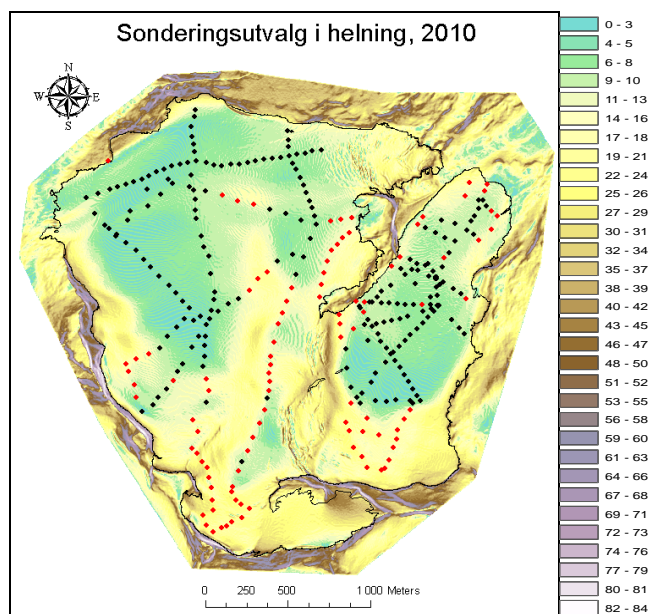
Figur 6.17 viser romlig fordeling for utvalgene i mer enn 10° og opptil 10° helning, mens figur 6.18 viser vinterbalansediagram for disse to utvalgene, samt for alle sonderingene. Utvalget i de bratteste partiene består av 104 sonderinger, og har en stor andel av sonderingene sør på breen. Utvalget i det slakeste partiet har 218 sonderinger og de aller fleste av sonderingene på den nordlige halvdel av breen. Plottene for b_w og volumvinterbalanse for utvalget i opptil 10° helning stemmer relativt godt overens med plottene for alle sonderingene, med unntak av høydeintervallet 1650-1700 m.o.h. Dette intervallet har kun 3 sonderinger (tabell 5.1) i dette utvalget, mens utvalget i mer enn 10° helning her har 17 sonderinger og stemmer langt bedre overens med plottene for alle sonderingene i dette intervallet. I intervallene fra 1700 til 1900 m.o.h. ligger b_w -grafene for utvalget i det bratteste partiet ca. 0,5-1 m.v.e. over b_w -grafene for alle sonderingene, og dette gir betydelige positive utslag på volumgrafene. Spesielt store positive utslag er det i intervallene 1750-1800 m.o.h. (0,87 km²) og 1800-1850 m.o.h. (0,75 km²), som er de to høydeintervallene som har størst areal.



Figur 6.16: Plottede standardavvik (verdier vist i tabell 6.7) for hvert høydeintervalls fire tilfeldige middelverdier (tilfeldig utvalg 1-4) for b_w og volumvinterbalanse.

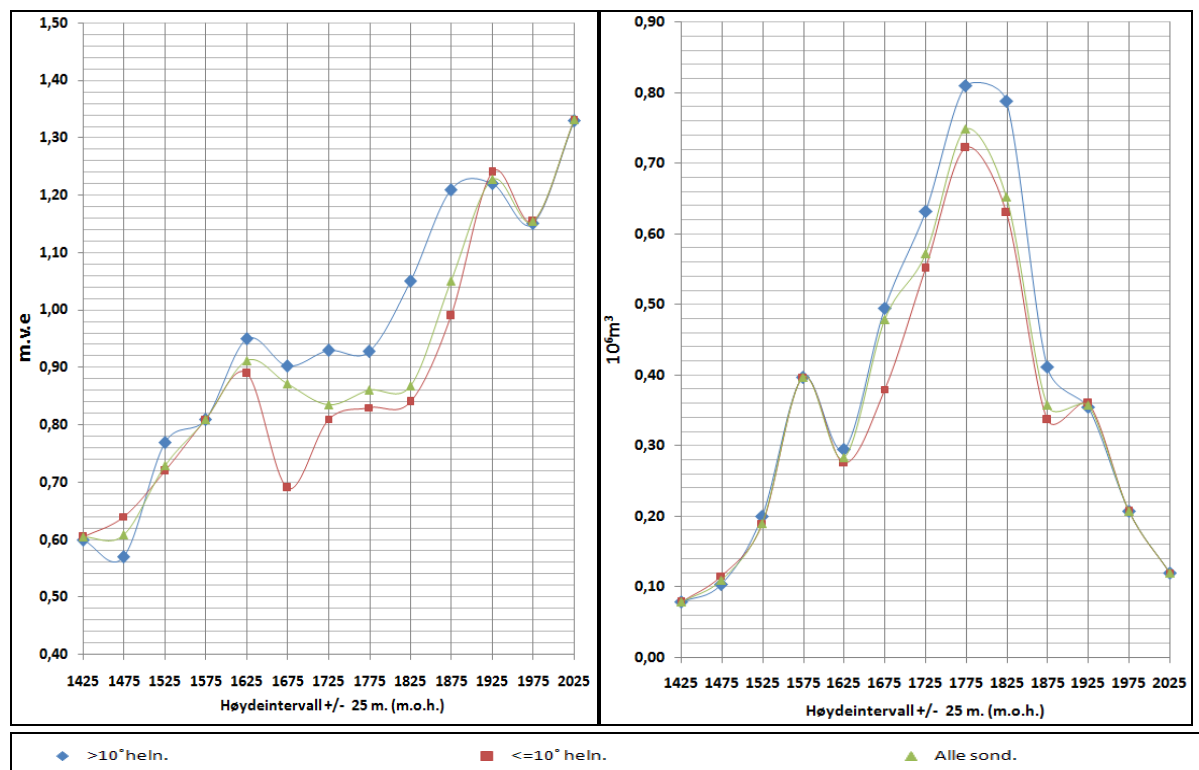
	b_w		Volumvinterbalanse	
Høydeintervall +/- 25m	Tilf. utv. 1-4, 50% standardavvik	Tilf. utv. 1-4, 25% standardavvik	Tilf. utv. 1-4, 50% standardavvik	Tilf. utv. 1-4, 25% standardavvik
2025	0,166	0,166	0,015	0,015
1975	0,042	0,080	0,008	0,014
1925	0,035	0,086	0,010	0,025
1875	0,016	0,022	0,005	0,008
1825	0,015	0,022	0,011	0,018
1775	0,007	0,021	0,005	0,019
1725	0,012	0,022	0,007	0,016
1675	0,043	0,074	0,025	0,040
1625	0,012	0,033	0,004	0,010
1575	0,004	0,017	0,000	0,007
1525	0,023	0,043	0,005	0,011
1475	0,025	0,022	0,004	0,004
1425	0,087	0,202	0,011	0,027
1400-2050 m	0,222	0,323	0,035	0,067

Tabell 6.7: standardavvik for hvert høydeintervalls fire tilfeldige middelveier (tilfeldig utvalg 1-4) for b_w og volumvinterbalanse.



Figur 6.17: Sonderingspunktene markert i rødt er lokalisert i terreng med mer enn 10° helning, mens punktene markert i sort er lokalisert i terreng med opptil 10° helning. Sonderingspunktene er overlagt helningskart basert på høydemodell fra 2009 i rasterformat, klassifisert i 32 klasser fra 0 til 84 grader helning

Vinterbalansekurver 2010 for sonderingsutvalg ut fra helning



Figur 6.18: (venstre) Plott for Spesifikk vinterbalanse (i m.v.e) og (høyre) volumvinterbalanse (i 10^6 m^3) for alle sonderingene, samt to utvalg: (1) et utvalg av sonderinger i punkter med mer enn 10° helning og (2) opptil 10° helning.

For utvalget i slakest terreng har sonderingenes snødybdeverdier størst spredning i intervallet 1900-1950 m.o.h. (standardavvik 0,18 – tabell 6.8), hvor utvalget kun har 5 sonderinger, samt 1850-1900 m.o.h. (standardavvik 0,14) og 1500-1550 m.o.h. I tillegg til for det høyeste og laveste intervallet, har utvalget i brattest terreng stor spredning i snødybde i intervallene 1650-1700, 1700-1750 og 1950-2000 m.o.h., med standardavvik på hhv. 0,15, 0,20 og 0,19.

Spesifikk b_w for hele breen regnet ut fra utvalget av sonderinger i mer enn 10° helning er 12,42 m.v.e., dvs. 0,56 m.v.e. mer enn total b_w . Tilsvarende resultat for utvalget av sonderinger i opptil 10° helning er 11,55 m.v.e., dvs. 0,31 m.v.e. mindre enn total b_w . Volumvinterbalansen for hele breen regnet ut fra utvalget av sonderinger i mer enn 10° helning og opptil 10° helning er hhv. 4,89 og 4,36 10^6 m^3 , som hhv. innebærer et positivt avvik på 0,34 10^6 m^3 (7,5 % av total

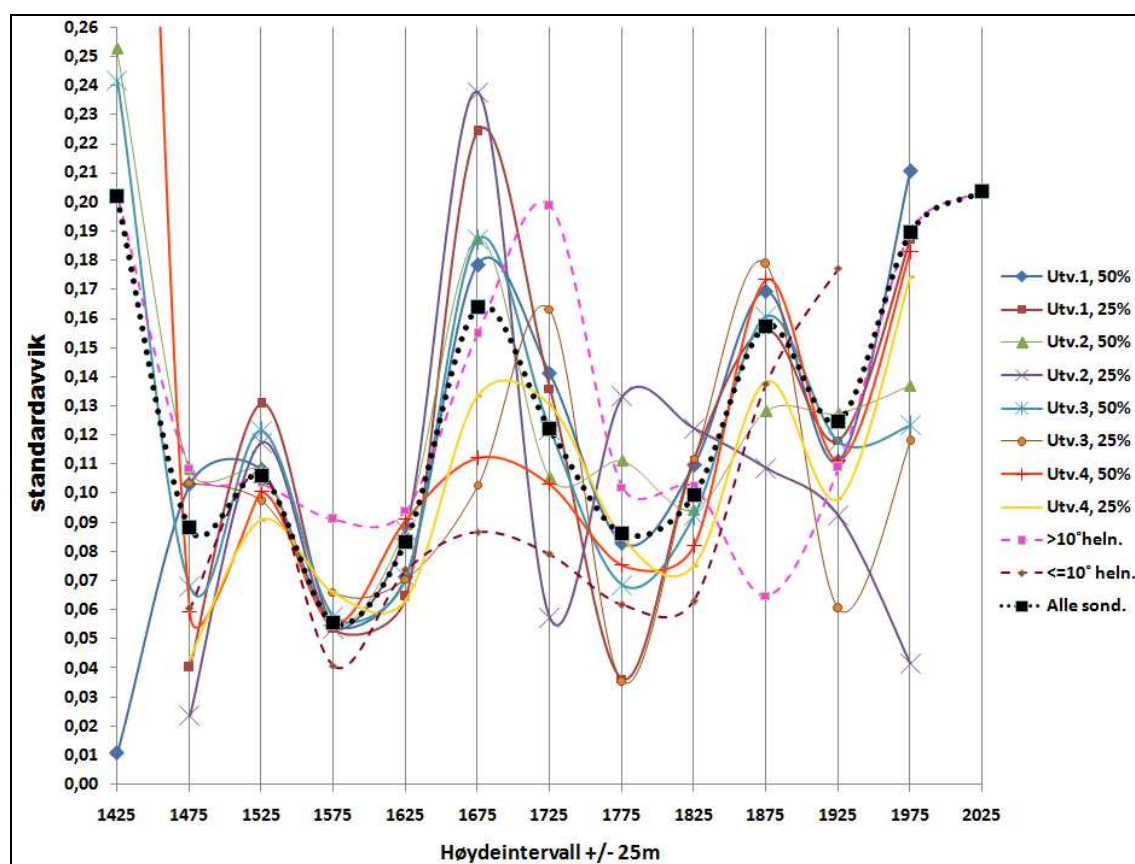
volumvinterbalanse) og negativt avvik på $0,19 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (4,2 % av total volumvinterbalanse) i forhold til total volumvinterbalanse.

	Tilfeldig utvalg 1		Tilfeldig utvalg 2		Tilfeldig utvalg 3		Tilfeldig utvalg 4		Utvalg, helning		Alle sond.
Intervall +/- 25m	Utv.1, 50% St.avvik	Utv.1, 25% St.avvik	Utv.2, 50% St.avvik	Utv.2, 25% St.avvik	Utv.3, 50% St.avvik	Utv.3, 25% St.avvik	Utv.4, 50% St.avvik	Utv.4, 25% St.avvik	>10° heln. St.avvik	<=10° heln. St.avvik	Alle sond. St.avvik
2025									0,20		0,20
1975	0,21	0,19	0,14	0,04	0,12	0,12	0,18	0,17	0,19		0,19
1925	0,11	0,12	0,13	0,09	0,12	0,06	0,11	0,10	0,11	0,18	0,12
1875	0,17	0,16	0,13	0,11	0,16	0,18	0,17	0,14	0,06	0,14	0,16
1825	0,11	0,11	0,09	0,12	0,09	0,11	0,08	0,08	0,10	0,06	0,10
1775	0,08	0,04	0,11	0,13	0,07	0,04	0,08	0,08	0,10	0,06	0,09
1725	0,14	0,14	0,11	0,06	0,12	0,16	0,10	0,13	0,20	0,08	0,12
1675	0,18	0,22	0,19	0,24	0,19	0,10	0,11	0,13	0,15	0,09	0,16
1625	0,07	0,06	0,09	0,09	0,07	0,07	0,09	0,06	0,09	0,07	0,08
1575	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,06	0,07	0,09	0,04	0,06
1525	0,11	0,13	0,11	0,12	0,12	0,10	0,10	0,09	0,10	0,11	0,11
1475	0,10	0,04	0,11	0,02	0,07	0,10	0,06	0,04	0,11	0,06	0,09
1425	0,01		0,25		0,24		0,66		0,20		0,20
1400-2050 m	0,19	0,19	0,18	0,17	0,18	0,19	0,17	0,19	0,23	0,13	0,18

Tabell 6.8: Standardavvik for alle sonderingsverdiene (i m.v.e.) i hvert høydeintervall i de 9 ulike utvalgene, samt alle de 322 sonderingsverdiene i 2010. I nederste rad er det vist totalverdier for alle sonderingene i hvert utvalg fra 1400 til 2050 m.o.h. Intervaller med 0 eller 1 sondering(er) står tomme i tabellen.

Beregningen av standardavvik for alle sonderingene i 2010 (tabell 6.8, figur 6.19) gir verdier på 0,16, 0,12 og 0,09 for hhv. intervallene 1650-1700, 1900-1950 og 1450-1500 m.o.h.. Dette er omtrent samme verdier som snittet av standardavvikene for alle sonderingene i 50%-utvalgene 1-4, med standardavvik 0,17, 0,12 og 0,09 for hhv. intervallene 1650-1700, 1900-1950 og 1450-1500 m.o.h.. 1650-1700 m.o.h. skiller seg enda mer ut i snittet av standardavvikene for alle sonderingene i 25%-utvalgene 1-4, som også her er på 0,17, mens standardavvikene for 1900-1950 og 1450-1500 m.o.h. er en del lavere (hhv. 0,09 og 0,05). Også intervallet 1850-1900 m.o.h. har høy spredning (standardavvik: 0,16) for alle sonderingene i 2010 (figur 6.19), og noe mindre i snittet av standardavvikene for alle sonderingene i 50%-utvalgene (0,16) og 25%-utvalgene (0,15). Dette intervallet har imidlertid mindre areal ($0,34 \text{ km}^2$) enn 1650-1700 m.o.h.. De tre intervallene med størst areal, 1750-1800 m.o.h. ($0,87 \text{ km}^2$) 1800-1850 m.o.h. ($0,75 \text{ km}^2$) og 1700-1750 m.o.h. ($0,68 \text{ km}^2$) har relativt lav spredning i forhold til 1650-1700 og 1850-1900 m.o.h., med standardavvik for alle sonderingene på hhv. 0,09, 0,10 og 0,12.

Standardavvik for sonderingene i alle utvalg



Figur 6.19: Plottede standardavvik (verdier i tabell 6.8) for alle sonderingsverdiene (i m.v.e.) i hvert høydeintervall i de 9 ulike utvalgene, samt alle de 322 sonderingsverdiene i 2010 (sort stiplet kurve). Standardavviket for tilfeldig utvalg nr. 4 (50% av sonderingene) 1400-1450 m.o.h. er høyest (0,66). Dette punktet er ikke vist i grafen, da verdiskalaen er kuttet på en lavere verdi.

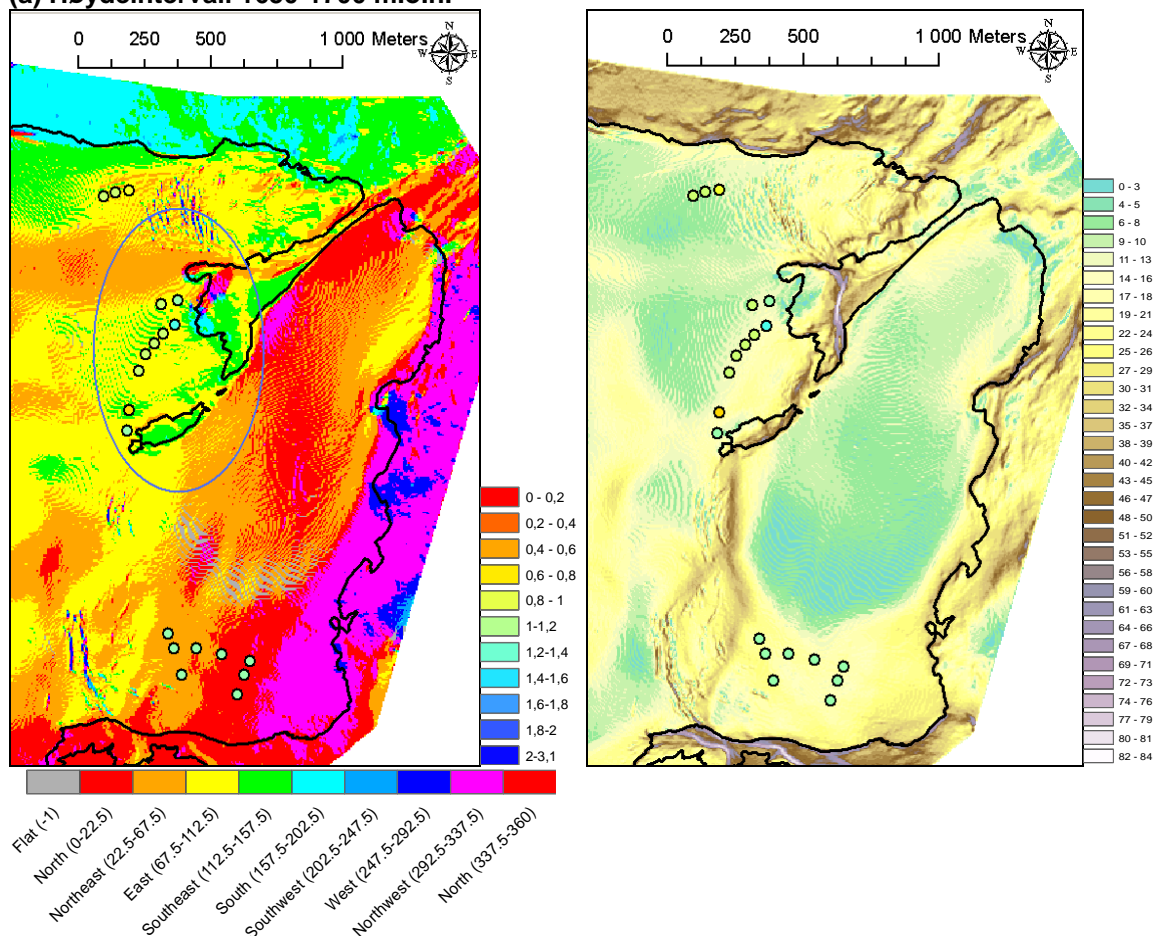
6.6 Variasjon i snøfordeling - sammenligning med helning og aspekt

De høye standardavvikene for 1650-1700 m.o.h. i 2010 indikerer relativt stor romlig variasjon i akkumulasjonen her, og når relativ snødybde sammenlignes med aspekt, er det tydelig at intervallet inneholder punkter med vidt forskjellig aspekt og fysiske avgrensninger. I figur 6.20 og 6.21 er sonderingene i ulike høydeintervaller for 2010 vist med klassifisert relativ snødybde over aspekt- og helningskart. Tendenser er

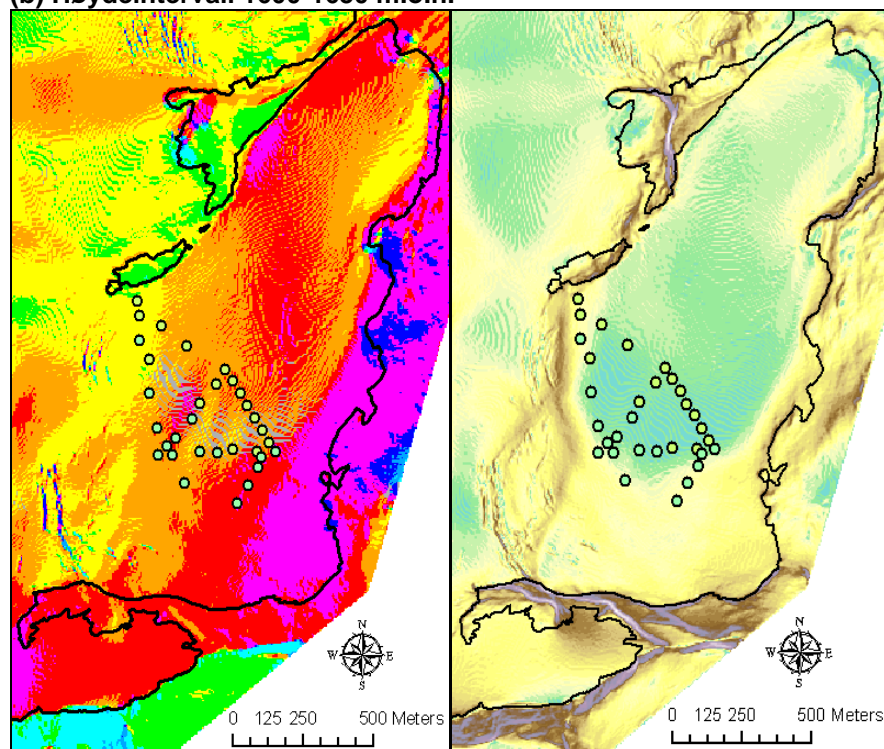
her trukket fram og sammenlignet med snøfordelingskart fra 1996 til 2010 (figur 6.10)

De midtre punktene (innenfor en markert blå ellipse på figuren) har også generelt lavere snødybde enn de sørligste punktene, men større variasjon. De nordlige av disse punktene ligger i et konvekst parti, på en liten oppstuvning mellom nordøstlig, sørøstlig og østlig aspekt. Nær det sørligste og det nordligste punktet skråner terrenget oppover mot øst, og disse punktene har relativt høy snødybde. I flere av årene 1996-2010 (figur 6.10), f.eks. 2009, 2005, 2004, 2003, 2002, 2001, 1999 og 1998, er det lav relativ snødybde der man følger den nevnte konvekse ryggen vestover, men noe høyere snødybde der terrenget heller sørøstover inn mot fjellknausen, hvor terrenget er mer konkavt. Hvor store områder det er med relativt høy akkumulasjon her varierer en del fra år til år, og det ser ut til å være spesielt store områder i 1998, 2003, 2004 og 2005.

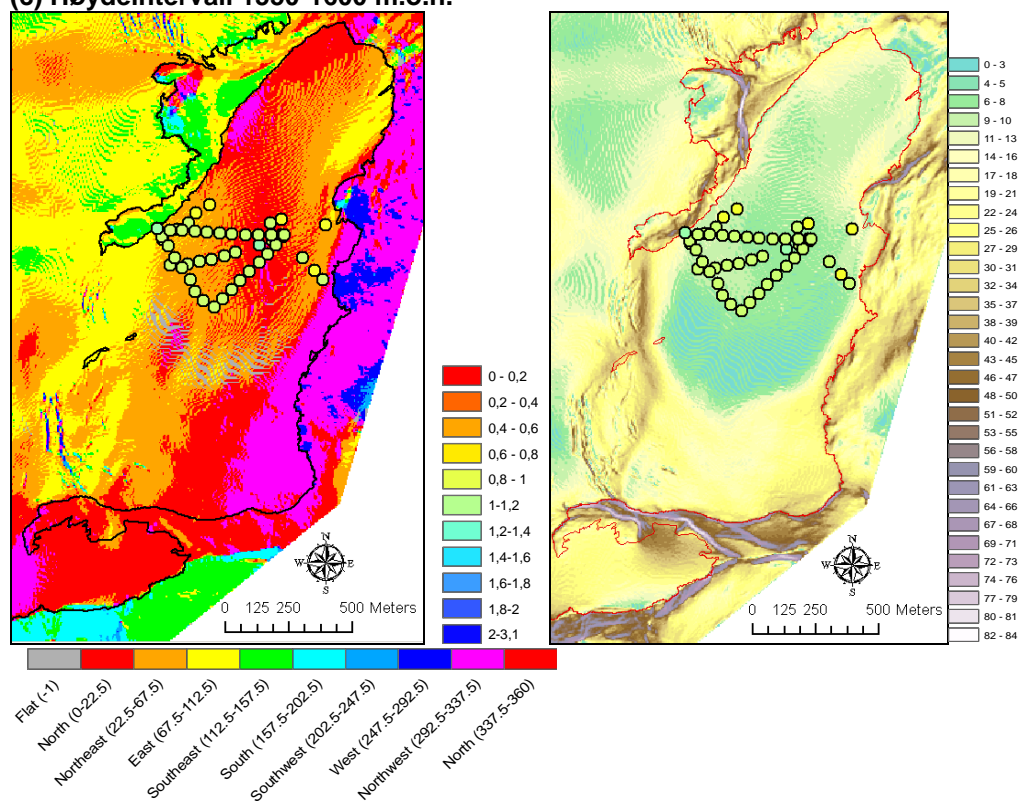
(a) Høydeintervall 1650-1700 m.o.h.



(b) Høydeintervall 1600-1650 m.o.h.



(c) Høydeintervall 1550-1600 m.o.h.



Figur 6.20: Utsnitt av kart over Storbreen, der sonderingspunkter fra 2010 i høydeintervallene 1650-1700(a), 1600-1650(b) og 1550-1600 m.o.h.(c) indikerer relativ snødybde. Sonderingspunktene er overløgt aspektkart (til venstre – legende under figur) og helningskart (til høyre - klassifisert i 32 klasser fra 0 til 84 grader helning) basert på høydemodell fra 2009 i rasterformat.

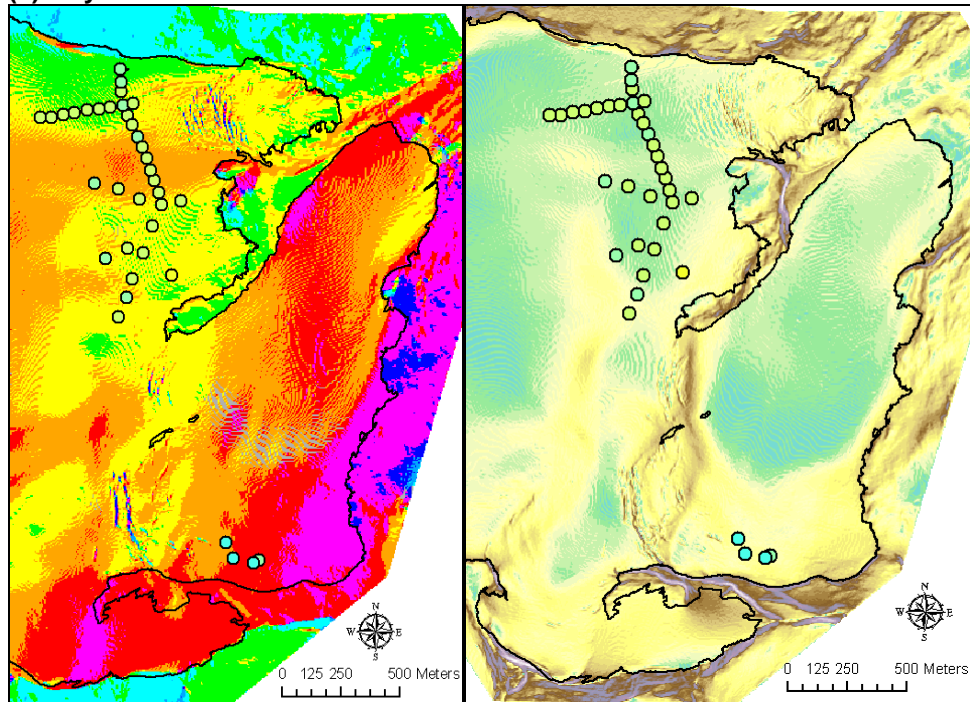
Sonderingsverdiene i høydeintervallet 1500-1550 og 1600-1650 m.o.h. har de laveste standardavvikene. Som figur 6.20 (c) viser, så ligger punktene fra 1550 til 1600 m.o.h. generelt åpent til med nordøstlig aspekt i det flate partiet på den nedre delen av breen. Punktene har relativt lav akkumulasjon, men punktene lengst øst, der terrenget skråner oppover, har noe høyere akkumulasjon. Et lignende mønster som i dette høydeintervallets punkter er det i alle akkumulasjonskartene 1996-2010 når man følger de lavereliggende punktene fra 1400 til 1500 m.o.h. lenger nord mot brefronten, med jevn snødybde i det slake partiet i midten og noe høyere opp med de hellende sidene (se figur 6.22). Den relative snødybden faller gradvis nordover i dette i dette partiet.

Intervallet 1600-1650 m.o.h. har relativt høy snødybde i forhold til høyden. Av figur 6.20(b) sees det at disse punktene i stor grad ligger i et konkavt parti mellom det slake partiet mot nord, nordlig/nordvestlig helning i sør og en bratt nordøstlig/østlig skråning mot øst. Punktene i sør har generelt høyest relativ snødybde av disse. Dette mønsteret stemmer generelt godt overens med kartene for relativ snødybde 1996-2010.

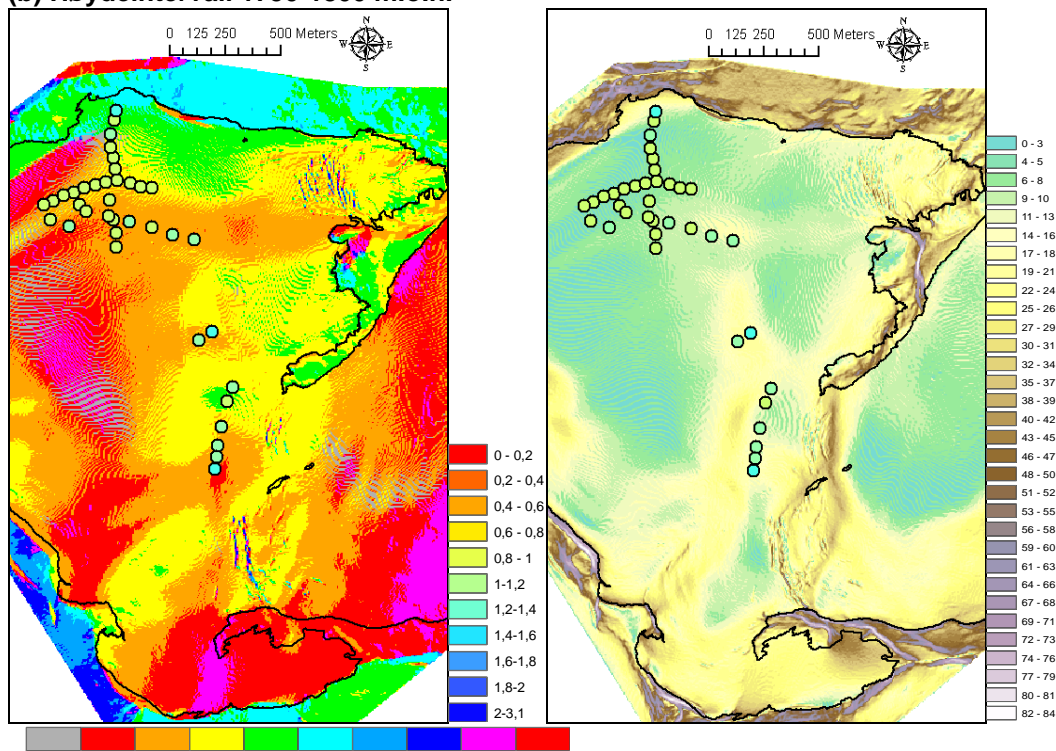
For verdiene i intervallet 1700-1750 (figur 6.21(a)), med gjennomsnittlig standardavvik på 0,12 (tabell 6.8) er det igjen tydelig at gruppen med sonderinger i den sørlige helningen med nordlig/nordvestlig aspekt skiller seg ut med relativt høy snødybde. I dette intervallet er det også punkter i det konvekse partiet mellom nordøstlig, sørøstlig og østlig aspekt nevnt for intervallet 1650-1700 m.o.h. Punktene lengst nord i den sørøstlig hellende skråningen (grønn farge) har noe høyere snødybde, men lavere enn i helningen lengst sør.

Intervallene 1750-1800 og 1850-1900 har relativt lave standardavvik, og som figur 6.21 (b) og (c) viser, så ligger punktene her hovedsakelig i de slake områdene i den nordvestlige delen av breen. Den nordlige gruppen av punkter 1750-1800 m.o.h. på den slake flaten med nordøstlig og østlig aspekt har generelt relativt lav snødybde.

(a) Høydeintervall 1700-1750 m.o.h.

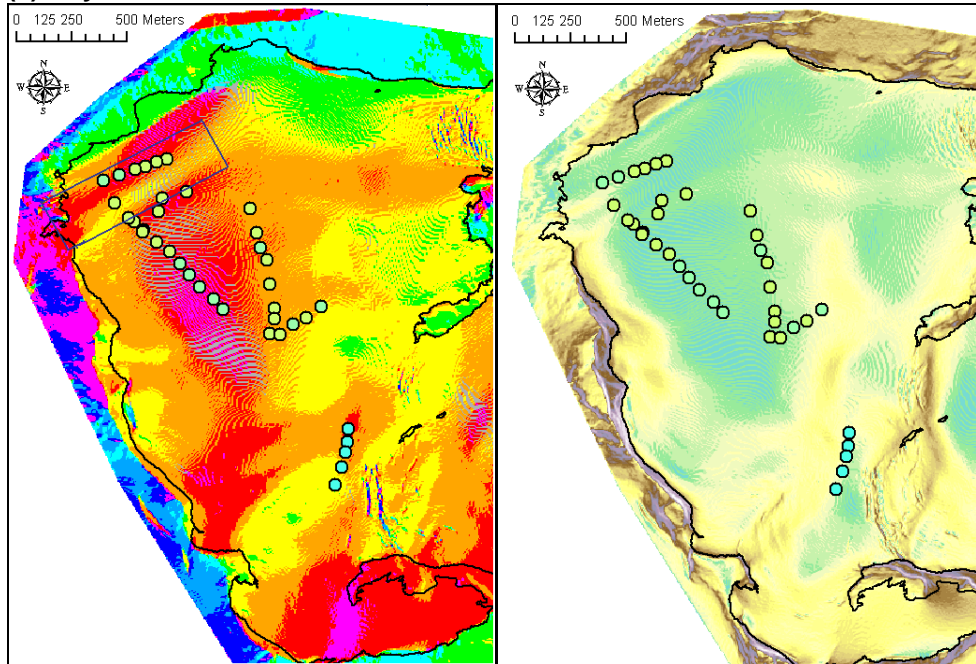


(b) Høydeintervall 1750-1800 m.o.h.

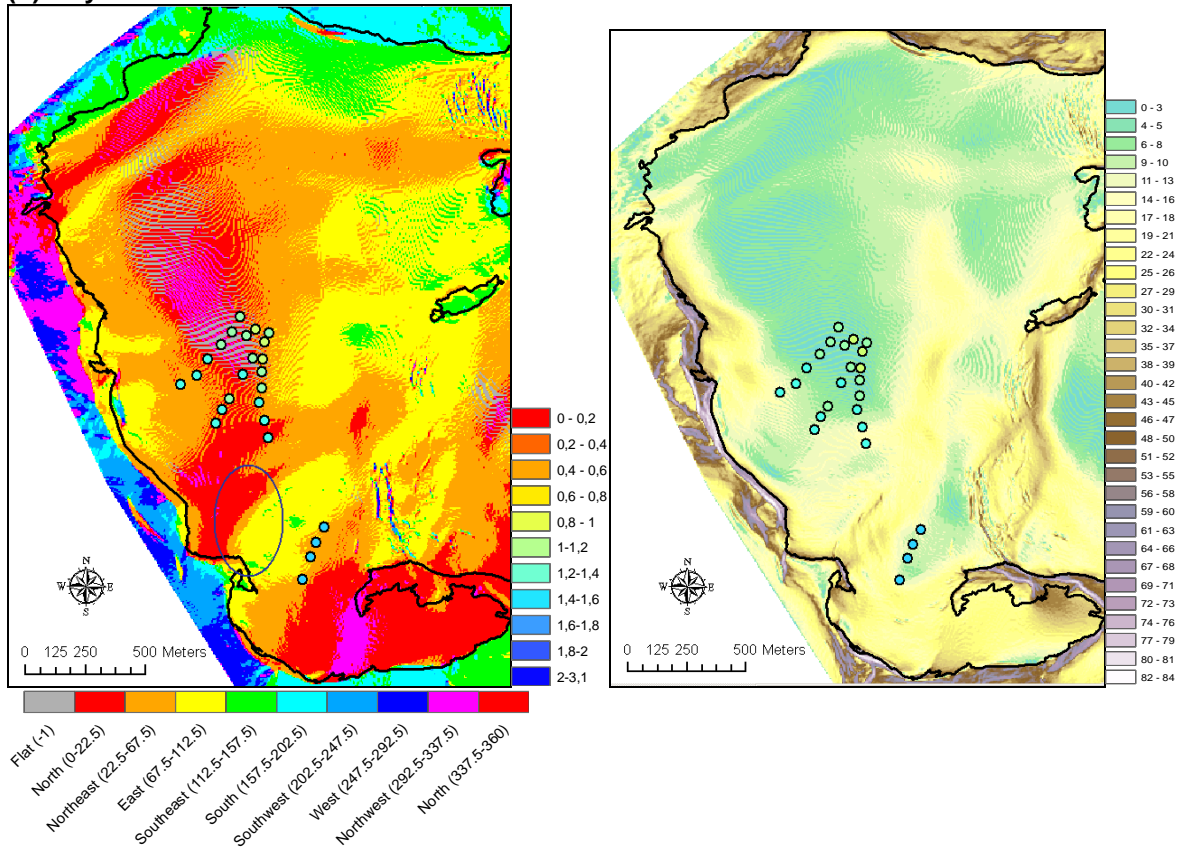


Flat (-1)
 North (0-22.5)
 Northeast (22.5-67.5)
 East (67.5-112.5)
 Southeast (112.5-157.5)
 South (157.5-202.5)
 Southwest (202.5-247.5)
 West (247.5-292.5)
 Northwest (292.5-337.5)
 North (337.5-380)

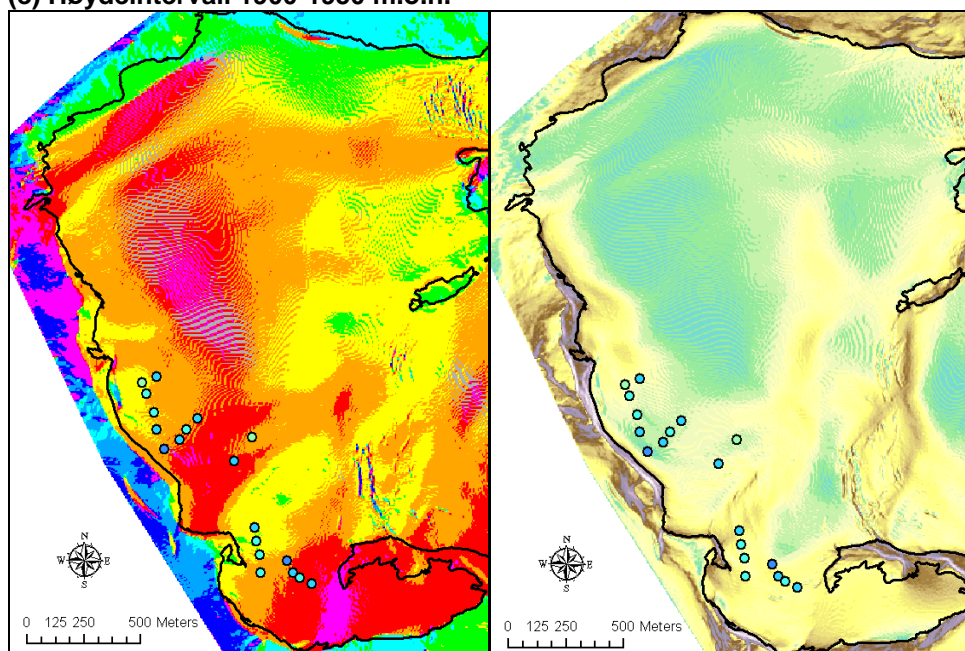
(c) Høydeintervall 1800-1850 m.o.h.



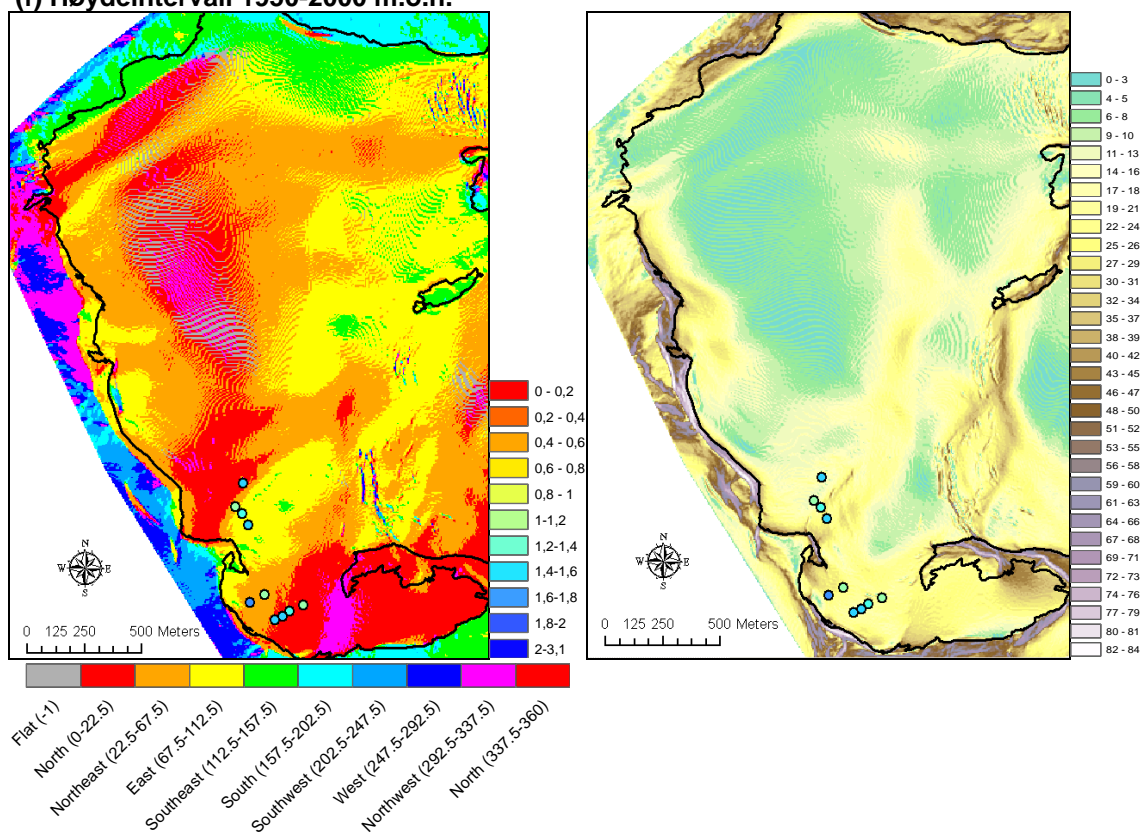
(d) Høydeintervall 1850-1900 m.o.h.



(e) Høydeintervall 1900-1950 m.o.h.



(f) Høydeintervall 1950-2000 m.o.h.



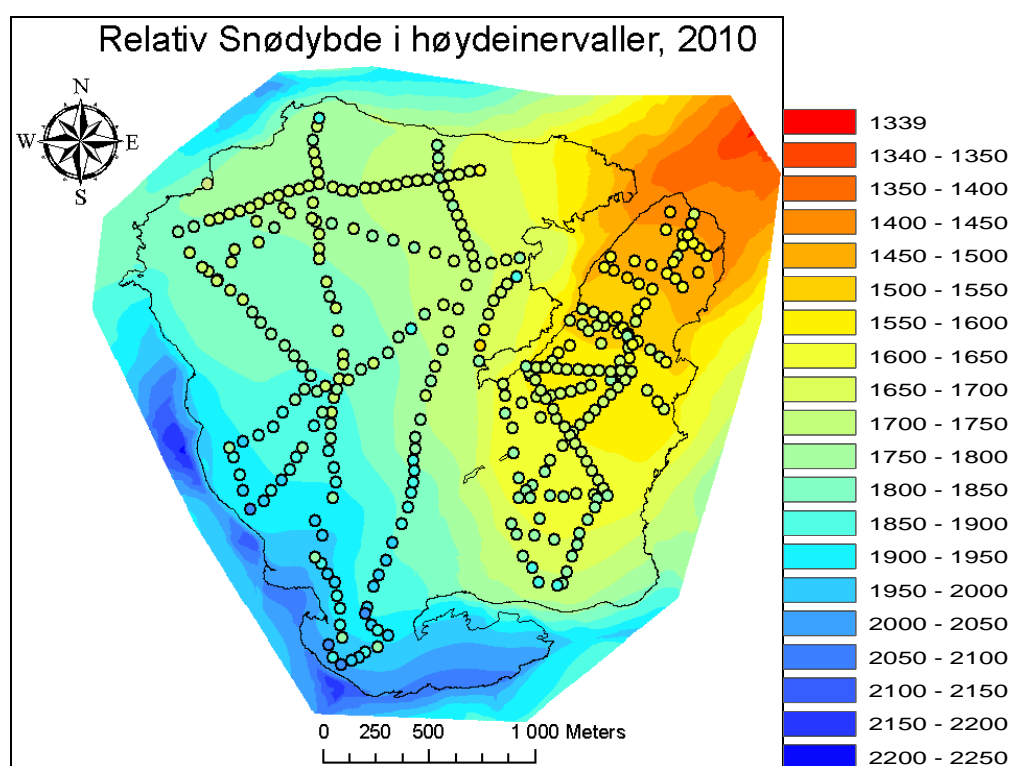
Figur 6.21: Samme som i figur 6.20, men for høydeintervallene 1700-1750(a), 1750-1800(b), 1800-1850(c), 1850-1900(d), 1900-1950(e) og 1950-2000 m.o.h.(f).

Punktene lengst nord er i en konkav helning med sørlig aspekt, og her er det relativt høy snødybde. Punktene lengst sør i begge intervallene 1750-1800 og 1800-1850 m.o.h. er i konkave nedsenkninger i terrenget (se f.eks "hillshade"-kart i figur 6.9), og her er det generelt relativt høy snødybde. Av punktene lenger nord 1800-1850 m.o.h. er det generelt en økning i relativ snødybde når man beveger seg sørover (og oppover, ettersom det er en svak nordlig helning her), lenger bort fra fjellpasset helt i nordvest. Lengst nordvest, der det er lav snødybde, er det også en liten konveksitet i terrenget (markert med blå rektangel i figur 6.21 (c). Høyden er også godt synlig i "hillshade"-kartene i figur 6.9). Snøfordelingen har i alle observerte år et bemerkelsesverdig avvik fra høydefordelingen i breens nordvestre hjørne, hvor akkumulasjonen generelt er relativt lav i forhold høydenivået. I mange av snøfordelingskartene 1996-2010 (figur 6.10 – spesielt tydelig f.eks 2009, 2005, 2006, 2000 og 2001) strekker det seg et område med relativt lav snøfordeling over store deler av de nordlige områdene fra fjellpasset i nordvest til brefronten i nordøst. Eksempelvis i snøfordelingskartene 2004, 1999 og 1997 ser dette kontinuerlige feltet med relativt lav snødybde ut til også å strekke seg rundt sørsiden av fjellknausen som splitter breen fra brefronten.

Områdene noe lenger nordøst med sørøstlig og sørlig aspekt (markert i grønt i aspektkartene) ligger noe lavere i terrenget, men har likevel høyere akkumulasjon enn det nordvestre hjørnet i alle kartene for relativ snøfordeling 1996-2010 (figur 6.10). Effekten er spesielt tydelig i snøfordelingskartene for 2007 og 1998, som ellers har svært forskjellig snøfordeling ettersom det i 2007 er større akkumulasjon i dette nordlige området enn i sør. Av snøfordelingskartene 1996-2010 så er det kun i 2007 at dette er tilfelle. Når det gjelder den relativt høye akkumulasjonen i det nevnte nordlige området på breen med sørøstlig og sørlig aspekt, er det interessant å se av aspektkartene (figur 6.9) at her er konkavt terreng mellom sørøstlig/sørlig helning mot fjellsiden og nordøstlig/nordlig helning sør for dette.

Sonderingsverdiene i intervallet 1850-1900 m.o.h. har også relativt høy spredning (figur 6.19) i 2010 og av figur 6.21 (d) sees det at den sørligste gruppen av punkter ligger i brattere helning med nordøstlig aspekt og har høyest relativ snødybde. De

nordligste punktene i intervallet befinner seg i et flatere terreng og det er tydelig at punktene lengst sør i brattest nordlig helning, har høyest snødybde. Den sørligste gruppen av punkter ligger også i le bak den bratte helningen markert med blå ellipse i figur 6.21 (d). Det gjør også mange av punktene fra 1900 til 1950 m.o.h. (figur 6.21 (e)) og fra 1950-2000 m.o.h. (figur 6.21 (e)), og lengst sør her ligger de to høyeste sonderingsverdiene (2004 og 2005 m.o.h.) som utgjør intervallet 2000-2050 m.o.h. I møte med nordvestlig helning fra sørøst er det her en konkav nedsenkning.



Figur 6.22: Sonderingspunktene relative snødybde fra 2010 overlagt topografisk kart basert på digital terrengmodell (DTM) fra 2009, klassifisert i 50 m høydeintervaller (benevnning i legenden: m.o.h.)

Punktene i intervallet 1900-1950 m.o.h. har lavere standardavvik enn 1850-1900 og 1950-2000 m.o.h., men høyere snødybde i forhold til høyde (se figur 6.18 – venstre). Det lavere standardavviket ser ut til å ha sammenheng med at alle punktene ligger i relativt bratt helning, i motsetning til for 1850-1900 m.o.h. En del av årene med snøfordelingskart i figur 10 har svært høy relativ snødybde i det bratte

området fra 1900-1950 m.o.h. Dette gjelder bl.a. 2004, 1998, 1996, 2009 og 2010, mens det er lavere verdier for 2002, 2007 og 1997. For 2006 og 2008 er det betydelig lavere relativ snødybde i dette området enn området lengst sør på breen, mens det for 2010, 2009 og 2000 er jevnere mellom disse områdene. Mange av akkumulasjonskartene har svakt observasjonsgrunnlag i disse områdene lengst sørvest og sør.

Noen punkter (2010) med lavere snødybde 1950-2000 m.o.h. i forbindelse med det bratte og kaotiske terrenget her medfører lavere snødybde i dette intervallet enn 1900-1950 m.o.h. Av akkumulasjonskartene 1996-2010 (figur 6.10) som viser sonderinger så langt sør som dette, skiller 2005 seg ut med stor variasjon i dette området, med så forskjellig maksimal og minimal relativ snødybde som 1,92 og 0,62. De andre snøfordelingskartene med målinger her, dvs. 2009, 2008, 2006 og 2000, har betydelig høyere relativ snødybde i området.

7 Diskusjon

7.1 Sammenligning av stakemassebalanse, totalmassebalanse og NAO-indeks

Korrelasjonen r^2 mellom b_w -totalverdier og NAO-indeks (1.okt.-30.apr.) for Storbreen 1951-2010 ble beregnet til 0,27 ($r = 0,52$). Denne ganske sterke korrelasjonen tyder på at nedbørsrike luftmasser som beveger seg østover innover fjellene i Sør-Norge fra vest, har stor innflytelse også så langt øst som Storbreen. Av Nesje et al. (2000) ble r^2 beregnet til 0,21 for perioden 1949-1998, så sammenhengen ser ut til å ha blitt noe sterkere i løpet av de siste 12 år. For periodene 1985-2010 og 1995-2010 er korrelasjonen r^2 litt høyere (hhv. 0,35 og 0,34). Det er også ganske sterk korrelasjon med b_n ($r^2 = 0,34$) for perioden 1985-2010, dog svakere ($r^2 = 0,19$) for 1995-2010, så vinternedbør transportert fra vest ser ut til å ha hatt en spesielt tydelig innflytelse på Storbreens massebalanse tidlig i denne perioden.

Som resultatene i tabell 6.1 og 6.2 viser, så er korrelasjonen mellom NAO og hver enkelt stakeposisjons b_w - og b_n -serie generelt lavere for det homogeniserte utvalget 1995-2010 enn for 1985-2010, med unntak av stakeposisjon 6. Dette skyldes at det for flere stakeposisjoner er relativt høy korrelasjon med NAO i perioden 1992-1997 (med unntak av 1994), som ikke er med i den homogeniserte serien fra 1995 til 2010. 1992-1997 er det f.eks. korrelasjon r med NAO (okt-apr) og b_w på 0,68, 0,56, 0,54 og 0,40 for hhv. stake 1, 5, 3 og 6, som er høyere enn for seriene i tabell 1 og 2. Som det kan sees av figur 6.2, 6.3 og 6.4, så er 1994, 2003 og 2005 år der b_w -stakeverdiene bidrar til svakere korrelasjon med NAO. 1993, 1994, 1998, 1999, 2002, 2003 og 2005 er år som bidrar til svakere korrelasjon mellom NAO og b_n -stakeverdiene.

Den spesielt høye korrelasjonen r mellom NAO og b_n og b_w i serien for den høytliggende stake 8 på 0,83 og 0,80, ser av figur 6.2 og 6.3 ut til å delvis skyldes at de få årene (10 år) med verdier for stake 8 generelt har høy korrelasjon med NAO, også ved de andre stakeposisjonene. Dette kan spekuleres i til dels også å ha sammenheng med stake åttes lokalitet nær fjellpasset nordvest på breen, som åpner opp for vind fra vest. Som det går fram av snøfordelingskartene i figur 6.10, så er det generelt relativt lave akkumulasjonsverdier i forhold til høydenivået i dette området, trolig som følge av kanalisering av vind gjennom fjellpasset. Stake 6 ligger mer i le fra vestlige og sørvestlige vinder pga Store Smørstabbtinden (2208 m.o.h.), som ligger ca. 500 m vest for stake 6, og er det høyeste fjellet i området (figur 3.3 og 1.2). Når vind når lesiden av fjellrygger, kan det observeres store fall i vindhastighet, som observert i Wannengrat-området i Sveits av Mott et al., (2010). Som vinddiagrammene basert på Storbreens AWS (figur 6.5) viser, så kommer en betydelig del av vinden fra vest, og vinddiagrammene fra Sognefjellhytta (figur 6.7) kan tyde på at vestvindene har en større dominans utenfor brebassenget mot vest. Etter at vinden har kommet inn fjellpasset fra vest kan den endre retning i hht. lokal topografi (jf. Giesen et al., 2009). Vinden kan også dreies sørover pga det nordlige og nordøstlige aspektet som dominerer på breen, jf. figur 6.9. Dermed kan vinden transportere snø østover og sørøstover mot brefronten.

Stake 5, ca. 500 m nord for stake 6, ligger også noe i le fra fjellryggen nordover fra Store Smørstabbtinden, dog i mindre grad enn stake 6. Både stake 6 og 5 har relativt lav korrelasjon med både vinterbalansen for hele breen og NAO, og deres plassering i ly av Store Smørstabbtinden kan bidra til dette. Stake 8 har i motsetning til stake 6 og 5 også relativt sterk korrelasjon med b_w og b_n (men ikke b_s), og dette kan også tenkes å ha sammenheng med tykning av snølaget her som følge av kanalisering av vestlige vinder gjennom fjellpasset. Det skal dog bemerkes at de få årene (10) med massebalanseverdier for stake 8 gir resultatene for denne staken lavere konfidens enn for stake 1-4 og 6, som har et mer solid datagrunnlag (tabell 6.1 og 6.2). Stake 3 og 4 ser ut til å være spesielt godt representative for hele breens massebalanse for både b_n , b_w og b_s , med så sterk korrelasjon r i den homogeniserte serien fra 1995 til 2010 som hhv. 0,95, 0,96 og 0,92 for stake 3 og

0,98, 0,96 og 0,93 for stake 4. Stake 3 og 4 ligger hhv. ca 1600 og 1715 m.o.h., og dette er noe lavere enn gjennomsnittlig ELA for perioden, som er ca. 1800 m.o.h. fra 1985 til 2010 og ca. 1860 m.o.h. fra 1995 til 2010. Basert på sesongmessige massebalanseprofiler beregnet Rasmussen og Andreassen (2005) høydene der korrelasjonen med totalmassebalansen er sterkest til 1775 m.o.h. for b_n og b_s , og 1625 m.o.h for b_w . For 10 breer i Norge, inkludert Storbreen, fant de at det var lite variasjon i massebalansegradient fra år til år.

Det skal fremheves at det er usikkerhet i datamaterialet som ligger til grunn for denne analysen. Stakeverdier er hentet fra notater med varierende grad av oversiktighet og kompletthet, og det kan ha forekommet misforståelser i prosessen med å samle dataene. Stakemåling og snødybdesondering har også flere kjente usikkerhetsmomenter og feilkilder, som nevnt i del 3.3 .

7.2 Relativ snødybde og variasjon i snøfordeling

Som det kan sees av kartene for relativ snødybde (figur 6.10), så har de sørlige delene av breen generelt få målepunkter sammenlignet med de nordlige, slik at usikkerheten ved interpolasjonene er spesielt stor her. Særlig kartene fra 1997, 1998, 2001, 2003, 2004 mangler observasjoner fra store deler av de sørlige områdene. I år med mangelfullt observasjonsgrunnlag i områder i sør og sørvest hvor det er sannsynlig å finne de høyeste akkumulasjonsverdiene, kunne flere målepunkter her sannsynligvis medført større intervall for relativ snødybde. Slike år kan derfor i realiteten ha høyere variasjon i relativ snøfordeling enn det som er illustrert i snøfordelingskartene og det som er vist i figur 6.12 (standardavvik, intervall og differanse mellom prosentiler). Det skal bemerkes at intervall for relativ snødybde ikke kan sees som en god indikator på høy eller lav snøfordeling alene, i og med at tallet kun beskriver forholdet mellom ekstreme maksimum- og minimumverdier. Disse indikatorenes negative korrelasjon med gjennomsnittlig snødybde, ser av snøfordelingskartene ut til å stemme ganske godt for mange av årene, særlig 2004, 2006 og 1996, som har lav gjennomsnittlig snødybde (figur

6.11) og tydelig stor variasjon i relativ snødybde. 1997, 1999, 2002 og 2007 har høyere gjennomsnittlig snødybde og en flatere romlig fordeling i snødybde. Det er ikke klart ut fra analysen her hva korrelasjonen skyldes.

Det er usikkert i hvilken grad nedbøren som faller over Storbreen i relativt milde døgn med positive døgnmiddeltemperaturer på høsten og våren kommer i form av regn eller snø, og i hvilken grad dette varierer mellom høydeintervallene oppover på breen. Den adiabatisk temperaturgradienten ($6,0\text{ }^{\circ}\text{C/km}$) medfører at en større andel av nedbøren kan falle som snø på høyere deler og regn på lavere deler av breen ettersom temperaturen er høyere på de lavere delene enn de høyere (Liestøl, 1967). Dette gjelder hovedsakelig på milde høstdager og vårdager når temperaturen varierer om frysepunktet ved forskjellige høyder. Storbreens høydespenn på ca. 700 m innebærer en temperaturredifferanse på $4,2^{\circ}\text{C}$ fra breens laveste til høyeste punkt ved en adiabatisk temperaturgradient på $6,0^{\circ}\text{C/km}$. Ettersom nedbør kan falle fra luftmasser høyere opp i atmosfæren med som regel lavere temperaturer, er det også usikkert i hvilken grad positive høst- og vårtemperaturer innebærer at nedbøren her faller som regn. Uansett så kan positive høst- og vårtemperaturer ved AWS og sammenfallende nedbør (som i figur 6.6) være en indikasjon på at det er mulig at nedbørsfase varierer opp gjennom breens høydeintervaller på de aktuelle tidspunkt. Ifølge Liestøl (1967) er ikke en slik effekt veldig tydelig på Storbreen. Ifølge samme artikkel fungerer vindtransport av snø nedover breen av dominerende vestlige vinder til dels utjevne på denne effekten. Sammenligningen her (tabell 6.3) av samlet nedbørsmengde i døgn med positive døgnmiddeltemperaturer med snøfordelingskart for ulike år danner heller ikke et bilde av at dette er en tydelig effekt. 2007 og 2002 har de høyeste og 2005 og 2004 de laveste registrerte nedbørsmengder i døgn med positive døgnmiddeltemperaturer, og man kan tenke seg dette bidrar til større variasjon i snødybde oppover breen som følge av nedbør i forskjellige faser. Men 2007/2002 og 2005/2004 er år med hhv. relativt homogen og relativt variabel snøfordeling (figur 6.10), så det er ingen indikasjon på en slik effekt her. Men nedbørsdataene brukt her for perioden er mangelfulle, så det må grundigere studier til for å kunne kvantifisere dette med større sikkerhet.

Det er et tydelig lokale variasjoner i relativ snødybde på Storbreen med relativt høyere snødybde i nedsenkninger og konkavt terreng, som f.eks. mot de bratte skråningene som omgir breen, og relativt lavere snødybde der det er konvekse trekk i terrenget. Sonderingene i 2010 er studert i lys av høydeintervallene på 50 m. Høydeintervallet 1650-1700 m.o.h., med spesielt stor spredning i sonderingsverdier, (figur 6.19) består av sonderinger med forskjellig aspekt og fysiske avgrensninger mot fjellsidene. De sørligste punktene på figuren har generelt høyest snødybde og ligger i nordlig og nordøstlig aspekt i le av fjellsider både i sør og øst, og er dermed lite utsatt for vindablasjon fra sørlige og vestlige vinder. De vestlige vindene som treffer disse punktene kan snarere bidra til å akkumulere snø mot fjellets avgrensninger mot vest og sør. Relativt høye vindhastigheter kan omfordele snø på bakken gjennom saltering- og suspensjonsprosesser (Mott et al., 2010). I tillegg bidrar interaksjon mellom vind og topografi ved snøfall til at mer snø lagres på lesiden enn losiden av helninger (Lehning et al., 2008). Liestøl (1967) nevner at leside-effekter som opphopning av snø nedenfor fjellsidene er betydelig lokalt, men at dette ikke bidrar til mye snøtransport fra områder utenfor breen.

De tre nordligste punktene 1650-1700 m.o.h. (figur 6.20 (a)) ligger åpent til i terreng med østlig aspekt og relativt lav helning på rundt 5°, og er utsatt for vindablasjon fra vestlige og sørvestlige vinder som kan blåse fra vest og videre nedover mot fronten. Vinder som blåser nedover breen er ifølge Giesen et al. (2009) dominerende på Storbreen. Det konvekse partiet mellom nordøstlig, sørøstlig og østlig aspekt med relativt lav snødybde i figur 6.20 (a) kan være utsatt for vindablasjon. Ifølge Liestøl (1967) er det tydelig effekt på Storbreen at snø blåser fra konvekse til konkave deler. Sør i det markerte området er det et målepunkt med sørøstlig aspekt med svært lav relativ snødybde. Nær det sørligste og de nordligste punktene, som alle har relativt høy snødybde, er det fjellknauser som skråner oppover mot øst. Her kan transportert snø fra vest, sørvest og sør ha blitt akkumulert i møte fjellknausene.

I det konkave partiet med relativt høye snødybder i intervallet 1600 til 1650 m.o.h., kan vind fra lenger opp på breen i vest ha akkumulert vindtransportert snø, mens

partiene med slak helning nedover breen nordover mot brefronten er mer utsatt for vindablasjon. Det er også partiene med slak østlig, nordøstlig og sørøstlig helning nordvest på breen i intervallene 1750-1800 og 1850-1900 m.o.h. Det noteres også av Liestøl (1967) at det er relativt lave akkumulasjonsverdier i området ved fjellpasset nordvest på breen, og at dette skyldes kanalisering av vind gjennom passet som blåser snøen bort fra denne delen av breen. Områdene med generelt gradvis høyere sonderingsverdier sørover er mer i le for disse vindene bak Store Smørstabbtinden, og er dermed mindre utsatt for vinderosjon. I mange av snøfordelingskartene 1996-2010 (figur 6.10 – spesielt tydelig f.eks 2009, 2005, 2006, 2000 og 2001) strekker det seg et område med relativt lav snøfordeling over store deler av de nordlige områdene fra fjellpasset i nordvest til brefronten i nordøst. Dette kan tyde på at vestlige vinder eroderer og transporterer snø i et kanalisert belte fra fjellpasset og helt ut til brefronten. På veien østover kan vindtransportert snø bli akkumulert i f.eks i det nevnte konkave området helt nord på breen (grønn farge i aspektkartene). Områdene lenger mot sør er i større grad i le for vindene, og områdene lengst sør og sørvest med de største snødybdene har i tillegg til redusert vindablasjon også økt akkumulasjon pga lesideeffekter.

7.3 Massebalanseberegning for forskjellige utvalg av sonderingspunkter

Massebalansegrafene viser relativt stor spredning mellom de gjennomsnittlige sonderingsverdiene i det laveste og de to høyeste høydeintervallene og 1650-1700 m.o.h., både i 25%- og 50%-utvalgene. Dette er tydelig også i standardavvik-kurven for alle sonderingene i figur 6.19, og her er det i tillegg tydelig at det er relativt spredning i sonderingsverdier fra 1850 til 1900 m.o.h. Det at det for 50%- og 25%-utvalgene er større spredning i spesifikk vinterbalanse (figur 6.16) 1650-1700 og 1900-1950 m.o.h. enn 1450-1500 m.o.h. på tross av at det er færre sonderinger i sistnevnte intervall, tyder på at det er mer homogen snødybde 1450-1500 m.o.h.

Det laveste og de to høyeste høydeintervallene utgjør kun en liten del av breens areal, og stor spredning her har derfor liten innvirkning på volumvinterbalansen. Intervallet fra 1650 til 1700 m.o.h. har derimot et større areal på ca. $0,55 \text{ km}^2$, ca. 10,8% av breens areal, i 2010 (Kjøllmoen et al, 2011), og har større betydning for den totale volumvinterbalansen. Intervallene 1850-1900 ($0,34 \text{ km}^2$) og 1900-1950 m.o.h. ($0,29 \text{ km}^2$) er også store nok til at deres store spredning potensielt kan forskyve massebalansekurven (volum) hvis et skjevt utvalg av punkter måles. Et lite representativt utvalg vil ha størst betydning for volumvinterbalansen i de tre arealmessig største intervallene fra 1700 til 1850 m.o.h. Som en demonstrasjon på det hadde massebalanseberegningen av det skjeve utvalget for punkter i områder med mer enn 10° helning store positive avvik fra total volumvinterbalanse, mens utvalget for slakere områder lå nær representasjonen i beregningen av total b_w . Selv ved en så systematisk feilrepresentasjon har utvalget med mer enn 10° helning og opptil 10° helning ikke større avvik enn hhv. 7,5 % og 4,2 % i forhold til total volumvinterbalanse. Beregnet massebalanse for de tilfeldige utvalgene hadde små avvik på maksimalt 2,2 % av volumvinterbalansen basert på alle sonderinger.

Massebalansekurvene for alle sonderingene (f.eks figur 6.18) har to tydelige "knekk" ved intervallene 1600-1650 og 1900-1950 m.o.h. som skiller b_w -kurven og volumbalanse-kurven fra en ganske jevn hhv. lineær og parabel funksjon av høyden. Punktene i intervallet 1600-1650 m.o.h. har høy relativ snødybde i forhold til høyden, og som vist i figur 6.20, så ligger disse punktene i et konkavt parti mellom et slakt parti mot nord, nordlig/nordvestlig helning i sør og en bratt nordøstlig/østlig skråning mot øst. De tre arealmessig største høydeintervallene i de generelt slake og trolig betydelig vinderoderte områdene i nord og nordvest fra 1700-1850 m.o.h. (figur 6.21), trekker også massebalansekurvene i negativ retning. "Knekken" i massebalansekurvene fra 1900-1950 m.o.h. har sammenheng med at intervallet består av sonderingspunkter i bratte helninger inntil breens sørvestlige og sørlige fjellavgrensninger (figur 6.21). En stor del av vindene på Storbreen kommer fra vest og sør (figur 6.5), så disse punktene ligger i le for vindablasjon.

8 Konklusjon

Det har blitt gjennomført beregninger av vinterbalanse på Storbreen med utgangspunkt i fire tilfeldige utvalg av snødybdesonderinger fra 2010, og utvalg med hhv. mer enn 10° helning og opptil 10° helning. Utvalget med mer enn 10° helning og opptil 10° helning hadde avvik på hhv. 7,5 % og 4,2 % fra beregnet volumvinterbalanse basert på alle sonderingene. De tilfeldige utvalgene består av 50% og 25% av det totale antallet sonderinger. Beregnet massebalanse ut fra disse hadde mindre avvik fra total volumvinterbalanse (maksimalt 2,2 %) enn utvalgene ut fra helning.

Med utgangspunkt i massebalansediagrammene for de tilfeldige utvalgene, ble høydeintervaller med relativt stor snødybdevariasjon identifisert og analysert med hensyn til helning, aspekt og fysiske avgrensninger i terrenget. Av dette er det tydelig at det er stor spredning i sonderingsverdiene (2010) i noen høydeintervaller hvor målingene er gjort i terreng som varierer med hensyn på aspekt, helning og vindutsatthet. De nordlige og arealmessig største høydeintervallene, fra 1700 til 1850 m.o.h., er generelt i slakt terreng med svak helning mot brefronten, og her er det generelt lav variasjon og lave verdier for snødybde. Høydeintervallene 1650-1700, 1850-1900 og 1900-1950 har derimot relativt stor spredning i sonderingsverdier, og også betydelig nok areal til potensielt å kunne forskyve volummassebalansekurven ved skjev representasjon av sonderingspunkter. Disse intervallenes variasjon følger av geografisk variasjon i aspekt, helning og vindutsatthet.

Snødybden på Storbreen varierer lokalt med relativt høyere snødybde i nedsenkninger og konkavt terreng, som f.eks. mot de bratte skråningene som omgir breen, og relativt lavere snødybde der det er konvekse trekk i terrenget. I forhold til høyde er snødybden generelt relativt lavere i den nordvestlige delen av breen, der

et fjellpass åpner opp for kanalisering av vind nedover breen fra vest til øst, og dette kan observeres i kart som illustrerer den relative variasjonen i snødybde 1996-2010. Disse snøfordelingskartene viser at noen år, f.eks. 1996, 1998, 2004 og 2006, har større romlig variasjon i relativ snødybde enn f.eks. 1997, 1999, 2002 og 2007. Den romlige variasjonen, uttrykt ved intervall for relativ snødybde, standardavvik og differanse mellom 90-prosentil og 10-prosentil, har en negativ korrelasjon med gjennomsnittlig snødybde.

I en sammenligning av massebalanse for ulike stakeposisjoner med massebalanse for hele breen og NAO-indeks 1985-2010, er det funnet sterkest korrelasjon med hele breen ved stake 3 (ca. 1600 m.o.h.) og 4 (ca. 1715 m.o.h.), som ligger noe lavere enn gjennomsnittlig ELA for perioden 1985-2010 (ca. 1800 m.o.h.), for både b_n , b_w og b_s . For Storbreen er det funnet en ganske sterk korrelasjon mellom NAO-indeks (1.okt.-30.apr.) og hhv. b_w ($r^2 = 0,35$) og b_n ($r^2 = 0,34$), og korrelasjonen er generelt sterkere for lavereliggende enn høyereliggende staker. Korrelasjonen er spesielt svak for de høyereliggende stakene 5 og 6, som ligger i le bak Store Smørstabbtinden (2208 m.o.h.), og dermed er mindre utsatt for vindablasjon fra vestlige vinder. Den ganske sterke korrelasjonen med NAO-indeks tyder på at nedbørsrike luftmasser som beveger seg østover innover fjellene i Sør-Norge fra vest, har stor innflytelse også så langt øst som Storbreen

9 Referanseliste

Andreassen, L. M. 1999. *Comparing traditional mass balance measurements with long-term volume change extracted from topographical maps: a case study of Storbreen glacier in Jotunheimen, Norway, for the period 1940 1997*. Geografiska Annaler, Ser. A, 81(4), s. 467-476.

Andreassen, L. M., Elvehøy, H., Kjøllmoen, B., Engeset R.V., og Haakensen, N. 2005. *Glacier mass-balance and length variation in Norway*. Annals of Glaciology, 42, s. 317-325.

Andreassen, L. M., Oerlemans, J. 2009. *Modelling long-term summer and winter balances and the climate sensitivity of Storbreen, Norway*. Geografiska Annaler, 91A (4), s. 1–19.

Andreassen, L.M., Paul, F., Kääb, A., og Hausberg, J. E. 2008. *Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s*. Cryosphere, 2(2), s. 131–145.

Andreassen, L. M., Van den Broeke, M. R., Giesen, R. H., og Oerlemans, J. 2008. *A 5 year record of surface energy and mass balance from the ablation zone of Storbreen, Norway*, Journal of Glaciology, 54 (185), s. 245-258

Benn, D. I. og Evans, D. J. A. 2007. *Glaciers & Glaciation*. Hodder Arnold. 734 s.

Benson, C.S. 1961. *Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet*. Folia Geographica Danica 9, 13-37.

Burrough, P. A. og McDonnell, R. A. 2009. *Principals of Geographical Information Systems*. Oxford. 333 s.

Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L., Zemp, M. 2011. *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris. 114 s.

Cohen, J. 1988. *Statistical power analysis for the behavioral sciences (rev. ed.)*. Lawrence Erlbaum Associates. 474 s.

Giesen, R. H., Andreassen, L. M., van den Broeke, M. R., og Oerlemans, J. 2009. *Comparison of the meteorology and surface energy balance at Storbreen and Midtdalsbreen, two glaciers in southern Norway*. The Cryosphere, 3, s. 57–74. DOI: 10.5194/tc-3-57-2009.

Hambrey, M. og Glasser, N. 1978. *Glacial sediments: Processes, environments and facies*. Encyclopedia of Earth Sciences Series, Sedimentology, s. 513–531
DOI: 10.1007/3-540-31079-7_99

Holmlund, P. 1987. *Mass balance of Storglaciären during the 20th century*. Geografiska Annaler, 69A(3–4), s. 439–444.

Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Ottersen, G., og Visbeck, M. 2003: *An Overview of the North Atlantic Oscillation*, i "The North Atlantic Oscillation". Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Ottersen, G., og Visbeck, (Ed.). Geophysical Monograph Series, 134, 1-36.

Institute for Marine and Atmospheric research Utrecht (IMAU). 2011. *Automatic Observations on Glaciers*. Tilgjengelig fra:
<http://www.projects.science.uu.nl/iceclimate/aws/> (Oppsøkt 30.03.2011)

IPCC, 2007 [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.

Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Kjølmoen, B., Andreassen, L. M., Elvehøy, H., Jackson, M., og Giesen, R. H. 2010. *Glaciological investigations in Norway 2009.* Norges vassdrags – og energidirektorat (NVE).

Kjølmoen, B., Andreassen, L. M., Elvehøy, H., Jackson, M., og Giesen, R. H. 2011. *Glaciological investigations in Norway 2010.* Norges vassdrags – og energidirektorat (NVE).

Kjølmoen, B., Andreassen, L. M., Elvehøy, H., Jackson, M., Tvede, A. M., Laumann, T., og Giesen, R. H. 2007. *Glaciological investigations in Norway 2006.* Norges vassdrags – og energidirektorat (NVE).

Kjølmoen, B., Andreassen, L. M., Engeset R.V., Elvehøy, H., og Jackson, M. 2004. *Glaciological investigations in Norway 2003.* Norges vassdrags – og energidirektorat (NVE).

Lehning, M., Löwe, H., Ryser, M., og Raderschall, N. 2008. *Inhomogeneous precipitation distribution and snow transport in steep terrain.* Water Resources Research, 44, W07404. Doi:10.1029/2007WR006545.

Liestøl, O. 1967. *Storbreen Glacier in Jotunheimen, Norway.* Norsk Polarinstitutts Skrifter, 141. Norsk Polarinstitutts, Oslo, Norge. 63 s.

Liestøl, O. 1970. *Glaciological work in 1969.* Norsk Polarinstitutts Årbok 1969., s. 116-128.

Liestøl, O. 1975. *Glaciological work in 1973.* Norsk Polarinstitutts Årbok 1973., s. 181-192.

Mott, R., Schirmer, M., Bavay, M., Grünewald, T., og Lehning, M. 2010. *Understanding snow-transport processes shaping the mountain snow-cover*. The Cryosphere , 4, s. 865–900.

Müller, F. 1962. *Zonation in the accumulation area of the glaciers of Axel Heiberg island, N.W.T., Canada*. Journal of Glaciology, 4, 302-313.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate Prediction Center (CPC). 2011. *North Atlantic Oscillation (NAO)*. Tilgjengelig fra: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml> (Oppsøkt 30.04.2011)

Nesje, A., og Dahl, S. O. 2003. *The “Little Ice Age” – only temperature?*. The Holocene, 13, s. 139-45.

Nesje A., Lie, Ø., og Dahl, S., O. 2000. *Is the North Atlantic Oscillation reflected in Scandinavian glacier mass balance records?*. Journal of Quaternary Science, 15(6), s. 587–601.

Rasmussen, L. A., og Andreassen, L.M. 2005. *Seasonal mass balance gradients in Norway*. Journal of Glaciology, 51(175), s. 601-606.

Statens kartverk. 2011. Tilgjengelig fra: <http://www.statkart.no/> (Oppsøkt 21.01.2011).

Sulebak, J. R. 2007. *Landformer og prosesser*. Fagbokforlaget. 391 s.

Østrem, G. og Brugman, M. 1991. *Glacier Mass Balance Measurements: A Manual for Field and Office Work*. Norwegian Water Resources and Energy Administration, and Environment Canada, National Hydrology Research Institute Science Report no. 4, Saskatchewan, Canada.

Østrem, G. og Haakensen, N. 1999. *Map comparison or traditional mass-balance measurements: which method is better?*. Geografiska Annaler, 81A, s. 703-711

Østrem, G. og Liestøl, O. 1964. *Glasiologiske undersøkelser i Norge 1963*. Norsk Polarinstitutts Meddelelser nr 90 (59 s.). Særtrykk av Norsk Geografisk Tidsskrift, Bd. XVIII, 1961-1962, 1964.